

# **ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

## **FAKULTA STROJNÍ**



## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Měření drsnosti povrchu pro průmyslové aplikace

Surface roughness measurement for industrial applications

2017

Autor: Tomáš Hron

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Hošek, Ph.D.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího bakalářské práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

V Praze dne 16.6.2017

A handwritten signature in blue ink, reading "Tomáš Hron", with a horizontal dotted line underneath it.

Tomáš Hron

# Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá drsností povrchu. V teoretické části jsou představeny parametry povrchu, definice, vliv integrity povrchu na funkční vlastnosti plochy, vliv obrábění povrchu na jakost povrchu, způsoby měření a druhy přístrojů pro měření drsnosti povrchu. Ve druhé, experimentální části, je představena možnost měření integrovanou sondou pro měření drsnosti povrchu v obráběcích strojích. Naměřené hodnoty parametrů jsou komparovány s hodnotami dílenského a laboratorního drsnoměru. Závěrem bude provedeno vyhodnocení naměřených výsledků a následné zhodnocení pro efektivní využití v automatizaci strojírenské výroby.

## Klíčová slova

automatizace výrobních linek, Blum, ČSN EN ISO 4287 – 1997, ČSN EN ISO 4288 – 1996, drsnost povrchu, funkční plocha, geometrická specifikace výrobku, integrace měřicí sondy, kvalita výsledného povrchu, metrologie, měření drsnosti povrchu, mikrostruktura, normalizované charakteristiky povrchu, obrábění povrchu, parametry drsnosti povrchu, průmysl 4.0, průmyslová aplikace, struktura povrchu.

## Annotation

The subject of this bachelor thesis is the surface roughness. In the first, theoretical part, the following items are introduced: surface parameters, definitions, influence of surface integrity on surface functional features, effect of surface machining on surface quality, measurement methods and different types of instruments for surface roughness measurement. In the second, experimental part, there is a presentation of the option to measure surface roughness in machine tools with integrated sensor. Measured parameter values are compared to values of factory and laboratory roughness meter. In the conclusion you can find the evaluation of measured results and consequent ideas for effective use in machinery industry automation.

## Key words

Production line automation, Blum, ČSN EN ISO 4287 – 1997, ČSN EN ISO 4288 – 1996, surface roughness, functional surface, geometrical product specification, touch probe integrity, quality of finished surface, metrology, surface roughness measurement, microstructure, standardized surface features, surface machining, surface roughness parameters, industry 4.0, industrial application, surface structure.

# Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Janu Hoškovi, Ph.D. za věcné konzultace, připomínky a lidský přístup v odborném vedení mé bakalářské práce. Dále panu Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. za cenné rady, pomoc při zvládnutí nejen bakalářské práce a za zapůjčení měřících přístrojů katedry. Firmě Blum Novotest za velmi vstřícné zapůjčení sondy na měření drsnosti. V neposlední řadě firmě Misan s.r.o. v čele s Ing. Ondřejem Svobodou, Ph.D. za podporu při měření experimentu.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hron** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **420446**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**  
Studijní program: **Strojírenství**  
Studijní obor: **Informační a automatizační technika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Měření drsností povrchu pro průmyslové aplikace**

Název bakalářské práce anglicky:

**Surface roughness measurement for industrial applications**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešerše vztahu drsnosti povrchu s vlastnostmi funkční plochy.
- 2) Rešerše výsledné kvality povrchu na základě volby řezných podmínek obrábění.
- 3) Rešerše parametrů drsnosti povrchu a metod měření.
- 4) Provedení měření drsnosti povrchu za stanovených podmínek.

Seznam doporučené literatury:

- 1) Bumbálek, Bohumil, Odvody, Vladimír a Ošťádal, Bohuslav. Drsnost povrchu. Praha : SNTL, 1989.
- 2) Neckář, Ferdinand a Kvasnička, Ivo. Vybrané statě z úběru materiálu. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 1991.
- 3) Doc. Ing. Karel Slanec, CSc. Základy konstruování. Praha : ČVUT, 1996.
- 4) AB SANDVIK COROMANT. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Praha : Scientia, s. r. o., 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

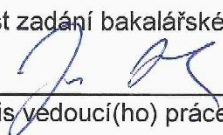
**doc. Ing. Jan Hošek Ph.D., ústav přístrojové a řídicí techniky FS**

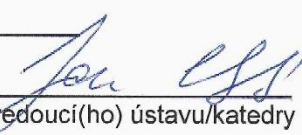
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

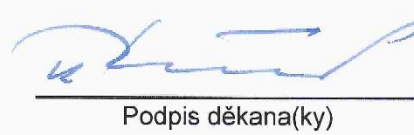
Datum zadání bakalářské práce: **19.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16.06.2017**

Platnost zadání bakalářské práce:

  
Podpis vedoucí(ho) práce

  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

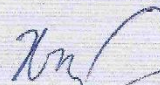
  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

**19. 4. 2017**

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

# Obsah

|       |                                                                             |        |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1     | Úvod.....                                                                   | - 9 -  |
| 1.1   | Motivace.....                                                               | - 9 -  |
| 2     | Teoretická část .....                                                       | - 11 - |
| 2.1   | Vlastnosti ploch .....                                                      | - 11 - |
| 2.1.1 | Materiálové tolerance.....                                                  | - 11 - |
| 2.1.2 | Geometrické tolerance.....                                                  | - 11 - |
| 2.2   | Jakost povrchu .....                                                        | - 12 - |
| 2.2.1 | Drsnost povrchu .....                                                       | - 13 - |
| 2.3   | Obrábění povrchu .....                                                      | - 14 - |
| 2.3.1 | Tvar třísek a vznik nárůstu.....                                            | - 16 - |
| 2.3.2 | Způsoby opotřebení břitové destičky.....                                    | - 16 - |
| 2.3.3 | Deformace povrchu obráběného materiálu vlivem řezného nástroje.....         | - 17 - |
| 2.3.4 | Zbytkové napětí – technologický vrub .....                                  | - 17 - |
| 2.3.5 | Volba požadované drsnosti .....                                             | - 19 - |
| 2.3.6 | Obrábění plastickou deformací materiálu .....                               | - 19 - |
| 2.3.7 | Obrobitelnost materiálu.....                                                | - 20 - |
| 2.3.8 | Příčiny geometrické nepravidelnosti [2] .....                               | - 20 - |
| 2.3.9 | Doporučení pro zvýšení jakosti obrobeného materiálu.....                    | - 21 - |
| 2.4   | Teoretická drsnost .....                                                    | - 21 - |
| 2.4.1 | Faktory ovlivňující odchylku výsledné drsnosti od drsnosti teoretické ..... | - 23 - |
| 2.5   | Historické značení drsnosti.....                                            | - 23 - |
| 2.6   | Povrch a jeho parametry (charakteristiky).....                              | - 24 - |
| 2.6.1 | Přehled a rozbor norem .....                                                | - 25 - |
| 2.6.2 | Pojmy parametrů .....                                                       | - 26 - |
| 2.6.3 | Základní parametry drsnosti povrchu – ve směru osy Z (výškové) .....        | - 32 - |
| 2.6.4 | Základní parametry drsnosti povrchu – ve směru osy x (podélný směr) .....   | - 37 - |
| 2.6.5 | Tvarové parametry povrchu - hybridní .....                                  | - 37 - |
| 2.6.6 | Vzájemná souvislost mezi parametry.....                                     | - 39 - |
| 2.7   | Typické číselné hodnoty parametru $R_a$ .....                               | - 39 - |
| 2.7.1 | Příklad parametrů drsnosti povrchu z katalogu drsnoměrů .....               | - 41 - |
| 2.8   | Měření drsnosti .....                                                       | - 41 - |
| 2.8.1 | Kvalitativní měření drsnosti povrchu .....                                  | - 42 - |

|        |                                                                                                                            |        |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 2.8.2  | Profilové a plošné metody kvantitativního měření drsnosti povrchu.....                                                     | - 43 - |
| 2.8.3  | Pravidlo 16 %.....                                                                                                         | - 43 - |
| 2.8.4  | Podmínky, které ovlivňují výsledky měření [25] .....                                                                       | - 45 - |
| 2.8.5  | Měření dotykovými profiloměry .....                                                                                        | - 45 - |
| 2.8.6  | Postup měření drsnosti povrchu .....                                                                                       | - 46 - |
| 2.8.7  | Konstrukční provedení mechanicko-elektrických snímačů dotykových profiloměrů.....                                          | - 46 - |
| 2.8.8  | Přístroje s okamžitou transformací profilu .....                                                                           | - 50 - |
| 2.8.9  | Optické měření drsnosti povrchu.....                                                                                       | - 50 - |
| 2.8.10 | Použití otisků pro měření drsnosti povrchu .....                                                                           | - 51 - |
| 2.9    | Vztah drsnosti povrchu a funkce plochy.....                                                                                | - 52 - |
| 2.10   | Vztah mezi drsností povrchu a předepsanou tolerancí.....                                                                   | - 54 - |
| 2.11   | Automatizace procesu .....                                                                                                 | - 55 - |
| 2.11.1 | Průmysl 4.0.....                                                                                                           | - 55 - |
| 2.11.2 | Prostorové hodnocení povrchu 3D .....                                                                                      | - 55 - |
| 2.12   | Alternativní možnosti sondy Blum TC64-RG.....                                                                              | - 56 - |
| 2.12.1 | Sonda od firmy Renishaw.....                                                                                               | - 56 - |
| 2.12.2 | Zeiss – SURFCOM C5.....                                                                                                    | - 56 - |
| 3      | Praktická část – experiment .....                                                                                          | - 57 - |
| 3.1    | Integrovaní měřících sond struktury povrchu firmy Blum do obráběcích strojů „vysoká kvalita, maximální produktivita“ ..... | - 57 - |
| 3.1.1  | Představení firmy Blum-Novotest.....                                                                                       | - 58 - |
| 3.1.2  | Nabídka sond firmy Blum .....                                                                                              | - 58 - |
| 3.1.3  | Hlavní schopnosti sondy TC64–RG .....                                                                                      | - 59 - |
| 3.1.4  | Vyhodnocované parametry .....                                                                                              | - 59 - |
| 3.1.5  | Software měření drsnosti RG 3.0 .....                                                                                      | - 59 - |
| 3.2    | Instalace sondy na stroj pro potřeby experimentu .....                                                                     | - 59 - |
| 3.3    | Obsluha sondy – základní příkazy .....                                                                                     | - 60 - |
| 3.3.2  | Ukládání výsledků do proměnných .....                                                                                      | - 62 - |
| 3.4    | Podmínky měření .....                                                                                                      | - 62 - |
| 3.4.1  | Představení obráběcího stroje Okuma MU-6300V s integrovanou sondou Blum ....                                               | - 62 - |
| 3.4.2  | Zkušební vzorek.....                                                                                                       | - 62 - |
| 3.4.3  | Vlivy na naměřené hodnoty .....                                                                                            | - 64 - |
| 3.4.4  | Podmínky měření pro snímací dotek .....                                                                                    | - 64 - |
| 3.4.5  | Geometrie snímacího doteku.....                                                                                            | - 64 - |
| 3.5    | Průběh měření drsnosti povrchu sondou Blum TC64-RG.....                                                                    | - 65 - |
| 3.5.1  | Kalibrace sondy .....                                                                                                      | - 66 - |

|       |                                                                                                                |        |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 3.5.2 | Upnutí vzorku do pracovního prostoru stroje.....                                                               | - 66 - |
| 3.5.3 | Určení pozice měřeného vzorku analogovou sondou.....                                                           | - 66 - |
| 3.5.4 | Vytvoření a vložení měřicího programu.....                                                                     | - 67 - |
| 3.5.5 | Volba vstupních podmínek.....                                                                                  | - 68 - |
| 3.5.6 | Měření drsnosti povrchu a vyhodnocení parametrů drsnosti .....                                                 | - 69 - |
| 3.5.7 | Grafický výstup měření .....                                                                                   | - 71 - |
| 3.5.8 | Výsledky měření – Blum.....                                                                                    | - 72 - |
| 3.6   | Kontrola drsnosti povrchu vzorku dílenským drsnoměrem Mitutoyo SJ201P-                                         | 74     |
|       | -                                                                                                              |        |
| 3.6.1 | Zkontrolování vyhodnocování parametrů dle etalonu .....                                                        | - 74 - |
| 3.6.2 | Upnutí zkušební vzorku.....                                                                                    | - 75 - |
| 3.6.3 | Volba měřených parametrů drsnosti a podmínek měření.....                                                       | - 75 - |
| 3.6.4 | Vyhodnocení parametrů drsnosti .....                                                                           | - 75 - |
| 3.7   | Kontrola drsnosti povrchu vzorku laboratorním přístrojem na měření drsnosti a<br>obrysů - Marsurf XCR 20 ..... | - 77 - |
| 3.7.1 | Upnutí zkušební vzorku.....                                                                                    | - 77 - |
| 3.7.2 | Volba měřených parametrů drsnosti a podmínek měření.....                                                       | - 77 - |
| 3.7.3 | Vyhodnocení drsnosti povrchu vzorku.....                                                                       | - 77 - |
| 3.8   | Shrnutí výsledků měření drsnosti povrchu.....                                                                  | - 78 - |
| 3.8.1 | Zhodnocení výsledků.....                                                                                       | - 78 - |
| 3.8.2 | Ekonomické zhodnocení.....                                                                                     | - 79 - |
| 3.8.3 | Návrh průmyslové aplikace .....                                                                                | - 80 - |
| 4     | Závěr bakalářské práce.....                                                                                    | - 81 - |
| 5     | Citovaná literatura.....                                                                                       | - 82 - |
| 6     | Seznamy.....                                                                                                   | - 85 - |
| 6.1   | Seznam obrázků .....                                                                                           | - 85 - |
| 6.2   | Seznam grafů .....                                                                                             | - 86 - |
| 6.3   | Seznam tabulek.....                                                                                            | - 86 - |
| 6.4   | Seznam rovnic.....                                                                                             | - 86 - |
| 6.5   | Seznam myšlenkových map.....                                                                                   | - 87 - |
|       | Seznam zkratk .....                                                                                            | - 88 - |
| 7     | Přílohy .....                                                                                                  | - 89 - |
| 7.1   | Technické parametry Okuma MU-6300V .....                                                                       | - 89 - |
| 7.2   | CD .....                                                                                                       | - 89 - |



# 1 Úvod

Jemné mikrogeometrické nerovnosti povrchu, oproti povrchu ideálnímu, označujeme jako drsnost povrchu. Rozvoj vědy, zlepšování se v technických oborech a zvyšování kvality výrobků za použití progresivních materiálů nás nutí k přesnému technicko-ekonomickému předepisování výrobních požadavků od konstruktérů, až po přesně stanovenou kontrolu výrobků pro dodržení stanovené drsnosti povrchu. Struktura povrchu výrobku má značný vliv na celkovou kvalitu výrobku. Ovlivňuje životnost, spolehlivost, pevnost, únavu, vzhled a kluzné vlastnosti materiálu. Mezi další fyzikální a chemické vlastnosti způsobené přesností výroby funkčních ploch strojních součástí patří mimo jiné elektrický odpor, přestup tepla, magnetické vlastnosti, ztráty způsobené třením, odolnost proti opotřebení a korozi a následná hlučnost, doba záběhu a korozní únavu. Zkoumání, porovnávání, využívání znalostí o drsnosti povrchu a následné hodnocení drsnosti povrchu vede ke zvyšování jakosti a přesnosti chodu součástí, a tím i k efektivnosti a spolehlivosti celého zařízení. Především spolehlivost by měla být pro strojaře určujícím faktorem. Rozumný návrh konstruktéra přispěje ke zvolení správné technologie výroby a k následnému zvolení podmínek procesu. Zlepšení jakosti povrchu strojních součástí snižuje celkovou hmotnost dílu, dimenzovanou na určité podmínky zatěžování. V neposlední řadě správné nároky na drsnost povrchu značně ovlivní i výslednou cenu. Proto je zde potřeba volit drsnost co nejhrubší, ale zároveň ještě vyhovující pro správnou funkci plochy. Mezi jakost povrchu bereme v úvahu nejen drsnost povrchu, ale také nejistotu rozměrů, geometrického tvaru a polohy, a tvrdost povrchu součástí.

## 1.1 Motivace

Bakalářská práce se snaží poskytnout přehled na téma drsnost povrchu, který je zkompleťován z mnoha literárních zdrojů. Základní principy vychází z publikace docenta Bumbálka, který se celoživotně zabýval touto problematikou na světové úrovni. Informace jsou doplněny z mnoha současných odborných zdrojů ze světa metrologie.

V první, teoretické části, se věnuji především porovnání normalizovaných i odvozených parametrů a jejich jasnému definování. Také jsou uvedeny způsoby vzniku mikrostruktury povrchu a to, jak změna výrobní technologie a řezných podmínek ovlivňuje kvalitu výsledného povrchu. Čtenáři je nabídnuta základní představa vazeb mezi konstrukcí, výrobní technologií a metrologií. Způsoby měření a základní typy měřících přístrojů jsou rovněž součástí teoretické rešerše.

Hlavním přínosem bakalářské práce je část experimentální. Experiment se věnuje problematice integrování přístroje měření drsnosti povrchu do číslicově řízených obráběcích strojů. Jedná se o reakci německé firmy Blum na dnešní stále rozšířenější automatizaci výrobních linek. Hlavní nespornou výhodou je urychlení vyhodnocení mikrostruktury povrchu obrobku během výroby zařazením procesu měření povrchu. Pokračování obrábění bez nutnosti vyjímát rozpracovaný dílec z obráběcího stroje představuje velmi přínosný způsob eliminace chyb vznikajících v důsledku přepínání obrobku. Tuto jedinečnou novinku představila firma Blum v České republice poprvé v roce 2014 na mezinárodním strojírenském veletrhu v Brně. Vzhledem k častému zájmu a množství dotazů potenciálních zákazníků o tuto technologii mě firma Misan s.r.o.

požádala o zhodnocení reálného přínosu této kontrolní metody při uvažovaném nasazení v průmyslové výrobě. Musíme zde brát v úvahu řadu aspektů zahrnujících možný měřicí rozsah, citlivost a přesnost zařízení. Zjištěním výsledků se pokusím navrhnout uplatnění pro využití této aplikace vzhledem k pořizovacím nákladům měřicí sondy. Výstupem práce by měl být rovněž stručný popis instalace hardware a software vybavení měřicího doteku na CNC obráběcí stroj Okuma MU-6300V včetně otestování měřících cyklů. Závěrem bude provedeno vyhodnocení výsledků měření, jejich verifikace nezávislou konvenční měřicí metodou a následné zhodnocení pro efektivní použití ve strojírenské výrobě.

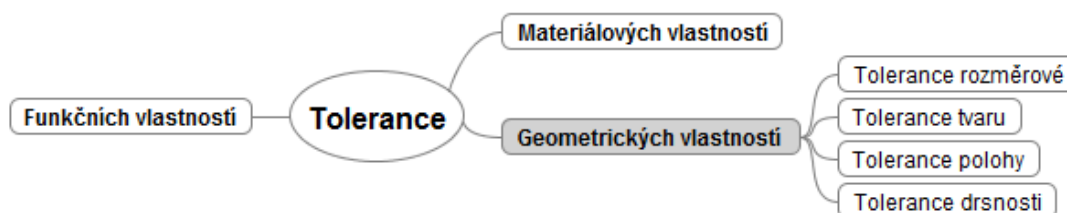
V návaznosti na výstupy práce bude možné dále pokračovat zkoumáním vztahů mezi naměřenou drsností povrchu a zvolenými řeznými podmínkami či opotřebením nástroje s cílem stanovit v rámci řídicího systému stroje automatický vyhodnocovací algoritmus. Výstup z algoritmu bude využitelný pro automatizované rozhodování o zařazení dalšího dokončovacího řezu s cílem dosažení stanovené integrity povrchu. Motivací celého procesu je zajištění bezobslužné výroby dílců s vysokými nároky na jakost dokončení funkčních ploch.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Vlastnosti ploch

Pozitivní směr dnešní doby v inovaci materiálů (využití progresivních materiálů vesměs s horší obrobiteľností), zlepšování povrchových vrstev, snižování hmotnosti při stejné pevnosti, využívání moderních řezných materiálů, zvyšování výkonu obrábění, účinnosti a spolehlivosti, v neposlední řadě snižování ceny a negativních dopadů na životní prostředí, nutně vede k dodržování norem a výkresové dokumentace. Vypracování výkresové dokumentace umožňuje zřejmou a jednoznačnou představu o funkci součásti, technologii výroby se zvolením vhodných podmínek obrábění a o následné kontrole dodržení tolerancí vyrobené součásti při procesu obrábění, odlévání či tváření. Tato problematika vyžaduje mimo jiné i vývoj měřicí techniky a nezbytné množství hodnotících metod za pomoci parametrů drsnosti povrchu.

Úplný popis tolerování v technické dokumentaci je jednoznačným nástrojem pro splnění požadavků konstruktéra. Výsledný produkt není ovlivněn osobními názory jednotlivých pracovníků, při kontrole jsou jasně odlišeny korektní kusy od zmetků. Výsledek závisí na optimálním stanovení tolerancí, jejich dodržení při výrobě a následné správně provedené kontrole výrobku. [1]



Myšlenková mapa 1 – Tolerance [1]

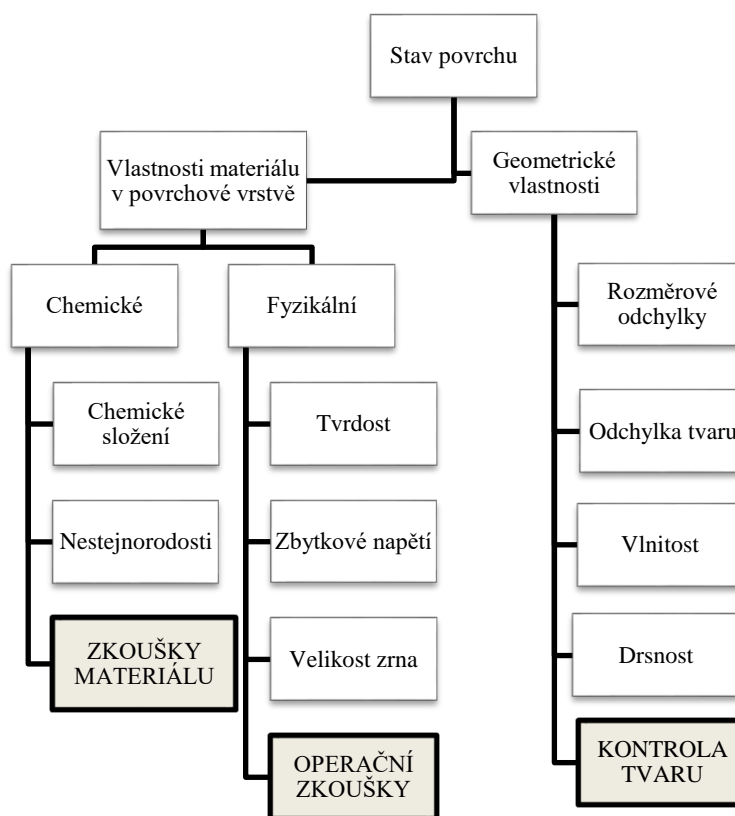
#### 2.1.1 Materiálové tolerance

Tolerance materiálové vypovídají o nejistotách chemického složení materiálu, strukturní stavbě na atomární úrovni a o jeho fyzikálních vlastnostech. Mezi fyzikální vlastnosti si uveďme například: pružnost, pevnost, tvrdost, magnetické vlastnosti, tepelná a elektrická vodivost. Tyto vlastnosti základního materiálu se mohou lišit od vlastností v povrchové vrstvě, která nás bude dále zajímat z funkčního hlediska. Je zde možná změna vlastností materiálu v průběhu času, například vlivem okolního prostředí. [1]

#### 2.1.2 Geometrické tolerance

Značný význam pro zaměnitelnost (výměnu) součásti má zvolení a dodržení správných tolerancí rozměrů, tvarů, poloh prvků, drsnosti povrchu a následná výrobní realizace a finální kontrola. Odchylka je rozdíl skutečného tvaru plochy od plochy jmenovité – ideální, která je určena konstruktérem v technické dokumentaci. Při výrobě není žádný obrobený povrch dokonale hladký a rovný. Tyto nedokonalosti vznikají nedokonalými podmínkami obrábění a nepřesností výroby. [1]

Povrchová vrstva funkčního prvku v souvislosti s její kontrolou je vyobrazena v myšlenkové mapě 2.



Myšlenková mapa 2 – Stav povrchu [1]

## 2.2 Jakost povrchu

Jakost povrchu je soubor vlastností zkoumané plochy objektu, které rozdělujeme na vlastnosti prostorového uspořádání povrchu – drsnost (textura, morfologie), dále potom na vlastnosti fyzikální a chemické. Na jakosti povrchu závisí velmi důležité vlastnosti jako například: účinnost, spolehlivost, funkční vlastnosti, vnější vzhled a v neposlední řadě také náklady celého procesu výroby. Při obrábění jakost povrchu ovlivníme volbou materiálu obrobku, správného řezného nástroje, zvolením vhodných řezných podmínek, a chladicí kapalinou. U často dynamicky namáhaných součástí se zabýváme únavovými součiniteli, vlastnostmi zvoleného materiálu a zkoumáme únavový lom, který vzniká na povrchu součásti nebo těsně pod ním. Z hlediska statického namáhání se nejčastěji setkáváme s případy namáhání tlakem, tahem, ohybem a krutem, kde největší napětí vzniká opět na povrchu součásti. Odolnost proti korozi pod funkčním napětím musíme zohlednit vzhledem k mikrogeometrii povrchu a následné hrozbě únavového lomu. [2]

Za integritu povrchu považujeme vztah mezi požadovanými funkčními vlastnostmi povrchu a změnou vlastností nového povrchu, které vznikly výrobou určitým technologickým postupem. To je způsobeno vztahem mikronerovností (geometrické vlastnosti), k fyzikálním vlastnostem (pnutí a tvrdosti). Povrch lze hodnotit pomocí dvou základních vlastností povrchu, a to prostorovým uspořádáním povrchu a fyzikálně-chemickými vlastnostmi povrchové vrstvy. Drsnost povrchu se využívá nejen v aplikaci strojní výroby, ale také například ve stavebnictví, dopravě při řešení drsnosti dopravních cest, při práci se dřevem a v neposlední řadě také ve vojenské technice. [2]

## 2.2.1 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu neboli mikrogeometrie je důležitá především pro funkční vlastnosti povrchu. Drsnost definujeme jako velmi malé (nejmenší) nepravidelnosti (odchyly) od ideálního profilu povrchu idealizovaného jako přesně rovný a hladký, lesklý povrch. Drsnost vzniká například dokončovací metodou působením řezného nástroje či brusného kotouče. Předepisování požadovaných vlastností povrchu podle norem, které umožní jednoznačnou kontrolu a srovnání, je základní podmínkou vyměnitelnosti součástí. Při obrábění vytváří řezné nástroje, volné brusivo, jiskrové výboje nerovnosti obrobeného povrchu. Tyto stopy na povrchu vznikají nejen při hrubovacích operacích, ale i při operacích dokončovacích. Při zpracování kováním vznikají okuje, nerovnosti od forem, zápustek a kovadel. Zdrsnění také vzniká při technologii ohýbání, kde nemusí být povrch zdrsněn v místě styku s nástrojem. Do drsnosti povrchu neuvažujeme náhodná poškození (vyboulení, otřepy, naraženiny, vyvýšeniny, staženiny) a původní vady materiálu jako jsou póry a trhliny. [1]

Množství změn povrchu je také ovlivněno tím, zda jde o operace hrubovací nebo dokončovací. Při hrubování jsou řezné síly velké, proto je nutno brát v úvahu tuhost funkčního celku stroj – upínání – nástroj – obrobek. Při dokončovací operaci nemusíme brát v úvahu tuhost soustavy, jelikož jsou řezné síly malé. [3]

### 2.2.1.1 Vady povrchu a jejich detekce

Možné defekty nevznikají jen v případě poslední technologické operace. Jsou výsledkem chyb při prvotní výrobní technologii (tváření za tepla, odlévání) až po tepelné zpracování součástí. Zjištěním typu vad (trhliny, póry, inkluze), definováním jejich tvaru, velikosti a četnosti, jsme schopni vyhodnotit, zda je součást kompetentní k požadované funkci. Nyní si představíme základní zkoušky pro vyhodnocení vad povrchu. [4]

Zkoušky zjišťování vad dělíme na destruktivní a nedestruktivní. Mezi často používané zkoušky nedestruktivní patří vizuální kontrola, buď pouhým zrakem kontrolora, nebo různými pomůckami (lupa, mikroskop). Výhodné je zvýraznění barevnou nebo fluorescenční kapalinou, která penetruje do povrchových nerovností. Tato metoda se nazývá kapilární. U magnetických materiálů lze odhalit i podpovrchové vady práškovou metodou, při níž feromagnetický prášek vyznačí místo trhlín. Povrchově citlivé vlny jsou využity v metodě ultrazvukové. Piezoelektrické a magnetostrikční ultrazvukové sondy využíváme pro buzení a detekci akustické energie. Využití ultrazvuku nám poskytne informaci o poloze i velikosti defektu, navíc je tato metoda nezávislá na magnetických a elektrických vlastnostech zkoumaného materiálu. [5]

Parametry struktury drsnosti měřeného povrchu nepoukazují na zjištěné nedokonalosti povrchu, jelikož se zde držíme pravidla, že vady (rýhy, póry) při měření do drsností neuvažujeme. K tomu nám přispěje, že měření provádíme na krátkých vyhodnocovacích úsecích – základní délce, v které se nám pravděpodobně neprojeví případné vady povrchu. [6]

Z důvodu mechanických či tepelných změn vznikají zbytková napětí a plastické deformace. Zpevněním povrchové vrstvy se mění pružnost, pevnost, tvrdost a mez únavy materiálu. Může dojít ke změně chemického složení, rekystalizaci (fázovým transformacím), změně stavu napjatosti a vzniku mikrotrhlín a makrotrhlín. Mechanické změny vznikají nejen při hrubovacích operacích, ale i při operaci dokončovací. Mohou vést ke vzniku poruch, které snižují spolehlivost strojní součásti. Chemické změny jsou

reakcí nově vzniklého povrchu s atmosférou nebo s jiným pracovním prostředím. Při broušení titanu nebo při elektrojiskrovém obrábění může docházet k přenosu chemických prvků z nástroje do obrobeného povrchu. Změna chemického složení povrchu, způsobená mechanismem absorpce nebo difuze, je ovlivněna pouze do velmi malé hloubky v řádu  $\mu\text{m}$ . Drsnost povrchu je také ovlivněna náhodnými defekty, například vytrháváním částic nebo přivařením materiálu. [7]

V následující tabulce 1 je shrnutí příčin vad a následků na povrchovou vrstvu.

Tabulka 1 - Příčiny a důsledky narušení povrchové vrstvy [7]

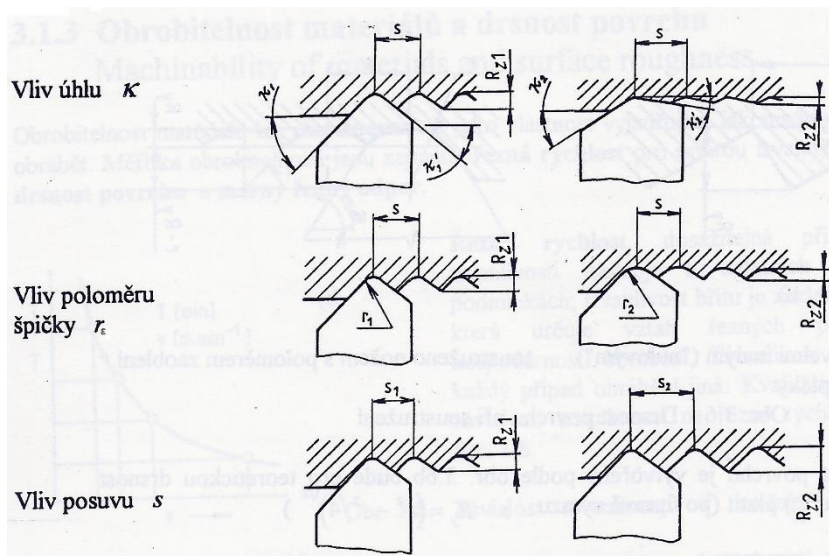
| Vliv         | Účinek                                  |
|--------------|-----------------------------------------|
| Mechanický   | Plastická deformace                     |
|              | Změny tvrdosti                          |
|              | Zbytkové pnutí                          |
|              | Mikro a makrotrhliny                    |
|              | Vytrhaný nebo převalovaný materiál      |
| Metalurgický | Fázové transformace                     |
|              | Velikost zrn a četnost jejich rozdělení |
|              | Velikost precipitátů a jejich rozdělení |
|              | Cizí vměstky                            |
|              | Dvojčatění                              |
|              | Rekrystalizace                          |
| Chemický     | Mezikrystalické napadení                |
|              | Mezikrystalická koroze                  |
|              | Mezikrystalická oxidace                 |
|              | Kontaminace                             |
|              | Zkřehnutí                               |
|              | Důlkové nebo selektivní leptání         |
|              | Koroze                                  |
|              | Koroze pod napětím                      |
| Tepelný      | Tepelně ovlivněná zóna                  |
|              | Přetavení materiálu                     |
|              | Přeskupení materiálu                    |
| Elektrický   | Změna elektrické vodivosti              |
|              | Změna magnetických vlastností           |

## 2.3 Obrábění povrchu

Prvotní výrobní technologií (tváření za tepla, odlévání) nejsme vždy schopni vytvořit povrch s požadovaným tvarem, geometrickou přesností, drsností a vlastnostmi povrchu. Požadovaného povrchu většinou docílíme třískovým obráběním původního přídavku materiálu. Nově obrobený povrch vznikne působením břitu rezného nástroje na obráběný materiál. V důsledku geometrie nástroje a jeho kinematického účinku vznikají na obrobku nerovnosti, které ještě důsledkem chemických a fyzikálních změn vlastností materiálu mají často charakteristické uspořádání. Geometrický tvar povrchu poukazuje na to, jakým způsobem byla zkoumaná plocha obráběna. Změna charakteru povrchové vrstvy a geometrie povrchu je způsobena změnou technologie obrábění, změnou podmínek obrábění, volbou rezného nástroje a jeho geometrie. Výsledný stav obráběného povrchu nejvíce ovlivní tvar břitu nástroje definovaný poloměrem zaoblení

$r_e$ , úhlem nastavení  $\kappa$  a vedlejším úhlem nastavení  $\kappa'$ . Nejvýznamnějším parametrem řezných podmínek je kinematický vztah mezi břitem nástroje a obrobkem – posuv. [2]

Vliv geometrie břitu a velikosti posuvu na drsnost povrchu je vyobrazen na obrázku 1.



**Obrázek 1 – Vliv geometrie břitu a posuvu na drsnosti [1]**

Teoretická drsnost povrchu se vyhodnocuje za těchto podmínek:

- Obráběný povrch se nedeformuje.
- Dokonalá tuhost soustavy stroj – nástroj.
- Ostří nástroje tvoří geometrické čáry a kinematické podmínky jsou neměnné.

Z mnoha příčin se skutečné nerovnosti liší tvarem, velikostí i četností a převládají do určitého směru. Nerovnosti jsou ovlivněny materiálovými a technologickými vlastnostmi. Volba řezných podmínek ovlivňuje materiálové vlivy, jelikož obrábění je způsobené plastickou deformací důsledkem mechanickým i tepelným. Chvění obrobku a nástroje, opotřebení břitových destiček, nepravidelnost ostří nástroje, změna řezného prostředí přívodem chladicí kapaliny z trysky nebo vysokotlakého vodního paprsku a tření hřbetu nástroje po obrobené ploše – všechny tyto stavy patří mezi vlivy technologické. [1]

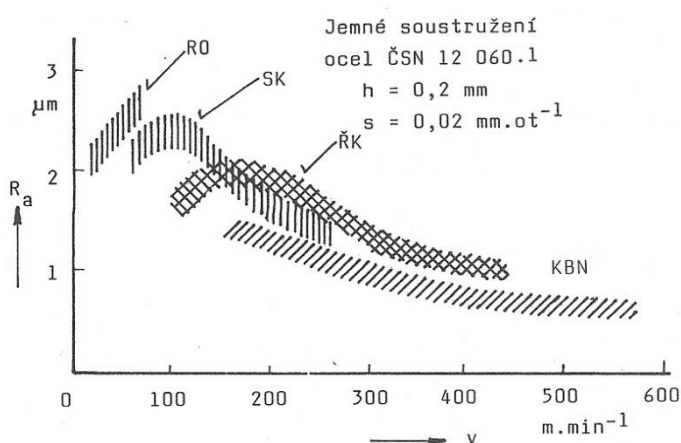
Na zhoršení drsnosti mají významný vliv materiálové faktory. Tento fakt je dán především mechanismem tvorby nového povrchu, který se mění podle struktury a vlastností materiálu. Teoretická drsnost se počítá z geometrických vzorců pro výpočet odebírané třísky. Výsledná teoretická drsnost nám vyjádří teoretickou maximální výšku nerovností ( $R_z$ ). Této znalosti využijeme při regulaci hodnot již zmíněných řezných podmínek, čímž se přiblížíme žádané drsnosti. [1]

Dnešní automatizace výrobních linek ve firmách vede k využívání maximálních přípustných řezných rychlostí. Z toho vyplývá vysoký stupeň plastické deformace, při obrábění za vysokých teplot. Fyzikálně-mechanické vlastnosti povrchu se změni vzhledem k jádru materiálu. Tento fakt opět vede k zamyšlení konstruktéra nad tím, že volba materiálu s vlastnostmi z materiálových listů a následné obrobení nemusí mít očekávané vlastnosti na povrchu. Změna mechanické vlastnosti povrchu (pevnost, tvrdost, houževnatost) se nejčastěji posuzuje podle změny tvrdosti. Vzhledem k tomu, že změny tvrdosti se projeví pouze ve velmi tenkých vrstvách, hodnotíme ji podle

průběhu mikrotvrlosti v závislosti na hloubce pod povrchem. Pro měření mikrotvrlosti využíváme ostrá vnikací tělíska podle Vickerse. [4]

### 2.3.1 Tvar třísek a vznik nárůstku

Při obrábění vznikají různé tvary třísek, které závisejí na mnoha faktorech obrábění. Jakost (drsnost) povrchu je ovlivněna odchodem třísky. Plynulé třísky mohou být zdrojem silně spěchované vrstvy obráběného materiálu – nárůstku, která se přichytí na ostří břitu nástroje. Vlastnostmi nárůstku jsou především pevnost a tvrdost. Nárůstek se vytváří a zaniká periodicky v závislosti na řezných podmínkách. Tvorba nárůstku je závislá především na řezné rychlosti (teplotě řezání) obráběného materiálu a na řezném prostředí. Nárůstek mění geometrii nástroje, tudíž i výsledný rozměr obrobku, zhoršuje drsnost z důvodu ulpívání nestabilní části nárůstku na obrobené ploše a v neposlední řadě způsobuje vibrace nástroje a obráběného materiálu. Neuvažujeme-li chvění, je nárůstek hlavní příčina vzniku podélné drsnosti při soustružení. Teoretické drsnosti bychom se mohli přiblížit při tvoření plynulé třísky bez nárůstku. Použitím vyšších řezných rychlostí a chladicí emulze, také změnou volby řezného materiálu, lze omezit vznik nárůstku nebo ho zcela vyloučit. Takové zvyšování produktivity vede i ke zlepšení povrchu obrobku. Vliv řezné rychlosti a obráběcího materiálu na drsnost je na grafu 1. Při technologii broušení je velmi obtížné určit teoretickou drsnost. [3]



Graf 1 – Vliv řezné rychlosti a materiálu nástroje na drsnost [4]

### 2.3.2 Způsoby opotřebení břitové destičky

Opotřebení řezné břitové destičky má výrazný vliv na zhoršení povrchu obráběného materiálu. Opotřebení závisí na poměru tvrdosti obráběného materiálu a obráběcího nástroje. Tento poměr může být ovlivněn i řeznou teplotou, pokud je materiál nástroje na tento jev náchylný. Vliv chemického opotřebení je vždy závislý na řezné teplotě způsobené řeznou rychlostí.

#### 2.3.2.1 Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení je způsobeno obrušováním povrchu břitu nástroje tvrdšími strukturními částicemi obráběného materiálu. Toto postupné mechanické otírání čela a hřbetu nástroje narušuje povrch břitu. V případě břitových destiček ze slinutých karbidů není abrazivní opotřebení vlivem martenzitu a cementitu velké. Jinak tomu je v případě obrábění legovaných ocelí a litin obsahujících karbidotvorné legury. [8]



#### **2.3.2.2 Adhezní opotřebení**

Mezi další výrazné zhoršení povrchu obráběného materiálu je způsobeno adhezním opotřebením. Základními podmínkami pro adhezní opotřebení jsou vysoké tlaky a chemicky čisté povrchy čela, hřbetu nástroje a obráběného materiálu v místě styku obrábění. Těmito podmínkami a růstem teploty opakovaně vznikají adhezní spoje – mikrosvary. Relativní pohyb nástroje s obrobkem způsobuje vlivem stříhu odtrhávání mikrosvarů. Odtrhávání materiálů probíhá jak na straně obráběného materiálu, tak i na straně materiálu řezného. Vzhledem k tvrdostem materiálů je objem odtržených částic na straně obrobku značně vyšší. Zhoršení drsnosti obrobku je způsobeno opakovaným vznikem a utržením mikrosvarů na straně obrobku. Adhezní opotřebení nástroje nám obráběný povrch dlouhodobě nekontrolovatelně zhoršuje. [8]

#### **2.3.2.3 Difuzní a oxidační opotřebení**

V případě břitových destiček ze slinutého karbidu nastávají difuzní mechanismy obráběného materiálu v případě obráběcích teplot vyšších než 900°C. Vzhledem k chemickému opotřebení nezáleží na tvrdosti materiálů, ale na teplotě obrábění a následných chemických procesech materiálů. Tento jev způsobuje výmol na čele, nebo oxidační rýhu na vedlejším břitu, což se výrazně projeví na drsnosti obráběného materiálu. Je zde několik řešení. Základním snížením oxidačních rýh je snížení řezné rychlosti. V případě nutnosti vysokých rychlostí a s tím následujících vysokých teplot je třeba zvýšit intenzitu chlazení. Použití speciálně povlakovaných, otěruvzdorných břitových destiček znatelně oddálí negativní opotřebení. [8]

#### **2.3.3 Deformace povrchu obráběného materiálu vlivem řezného nástroje**

Ostří obráběcího nástroje je vždy zaoblené a způsobuje stlačování a plastické tváření obráběného povrchu. Při posuvu nástroje původně stlačený materiál vystoupí vlivem pružné deformace. Trvalá deformace má za následek umělé zpevnění povrchové vrstvy, otupování nástroje a vznik nepravidelně drsného povrchu. Z důvodu vysokých obráběcích rychlostí a nedostatečného chlazení dochází třením a plastickou deformací k ohřívání povrchové vrstvy na vysokou teplotu. Při ochlazování ohřáté povrchové vrstvy se zmenšuje její objem, na rozdíl od spodní vrstvy s nízkou teplotou, která svůj objem nemění. Tyto procesy budou mít za následek tahová napětí v povrchové vrstvě. [9]

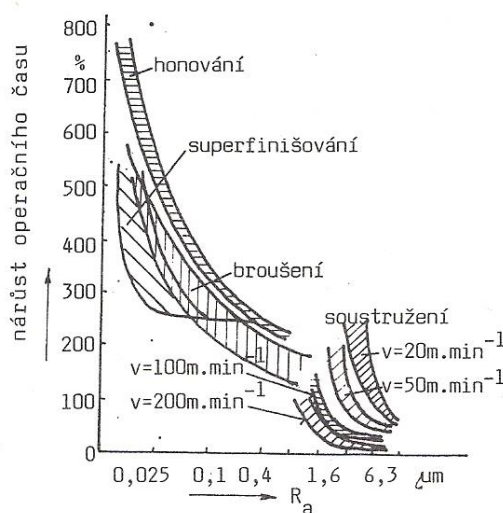
Pnutí povrchové vrstvy velmi ovlivňuje především mez únavy. Pnutí způsobená tlakem mez únavy zvyšují, zatímco tahová pnutí únavu snižují a způsobují některé z únavových poruch (trhlin, lomů). [1]

U obrábění ocelí vyšší tvrdosti jsou známy výsledky lepšího povrchu než u ocelí měkčích, kde je drsnost povrchu hrubší. [9]

#### **2.3.4 Zbytkové napětí – technologický vrub**

Jasný trend poslední doby ve zlepšování vlastností materiálů a jejich tepelném zpracování povrchu a na druhé straně snaha o minimalizaci výdajů za nutné množství materiálu vede ke chvályhodnému vývoji poměru pevnosti k hmotnosti. Toto snižování průřezu součástí zajisté vyžaduje větší pozornost zaměřenou na vznik provozních poruch, únav, trhlin a jejich nekontrolovatelného šíření v důsledku například špatné povrchové úpravy a následné koroze nebo účinkem zbytkových napětí. Tyto následky lze do určité míry ovlivnit morfologií (charakterem) povrchu, a proto je její znalost a sledování jakosti povrchu velkým zájmem především konstruktérů, technologů a metrologů. Při návrhu se musí počítat s tím, že součást ve stroji pracuje často za

extrémních podmínek teplot a prostředí. Právě intenzivní plastické deformace a extrémní teploty mají za příčinu vznik zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobku. Vliv zbytkového napětí na funkční vlastnosti součásti je podobný jako působení konstrukčního vrubu. Proto se někdy používá pro zbytková napětí termín *technologický vrub*. Tento „vrub“ je nebezpečný z hlediska složitosti zjištění běžnými kontrolními metodami a vzniká například při obrábění tupým nástrojem, při špatném přívodu kapaliny atd. Zbytková pnutí vznikají při mechanickém přetvoření povrchové vrstvy po dokončovacích operacích, jako jsou například honování, lapování, superfiniš. Plastická deformace je v případě válečkování, kuličkování a přehlazování podstatou této metody. Zbytková pnutí z makroskopického hlediska lze považovat za způsob předepnutí materiálu, se kterým musíme počítat. Z hlediska statické pevnosti lze říci, že technologický vrub nemá výrazný negativní vliv vzhledem k ovlivněné hloubce povrchu od jedné setiny až třech desetin milimetru. Vlivem na statickou pevnost se musíme zabývat pouze u extrémně tenkých součástí. Změna vlastností základního materiálu výrobním procesem je důležitou znalostí, která přispívá ke správnému řízení výrobního procesu s cílem finálních vlastností funkční povrchové vrstvy. Konstruktor by měl být schopen odhadnout, v jakém směru se změní vlastnosti povrchové vrstvy vzhledem k původnímu předpokladu vlastností výběru materiálu. Případně by měl umět navrhnout tepelné zpracování na odstranění zbytkových pnutí, které zlepší únavovou pevnost a napravit vliv extrémního způsobu obrábění. Pokud konstruktor nedisponuje těmito znalostmi, volí raději vyšší součinitel bezpečnosti, který z funkčního hlediska není nutný a z ekonomického hlediska je velmi nevýhodný. Cílem technologa by mělo být přizpůsobení technologie výroby s ohledem na funkci součásti v provozu. Závislost výrobních nákladů vzhledem k drsnosti povrchu je na grafu 2. Nejhorší poměr nákladů vzniká při obrábění vnitřních a tvarových ploch. [4]



**Graf 2 – Závislost výrobních nákladů na drsnosti povrchu [4]**

Podrobněji jsou strukturní změny po obrábění v povrchové vrstvě a vlivy vnitřního pnutí popsány v publikaci docenta Neckáře *Vybrané statě z úběru materiálu* [4] na straně 18-45.

### 2.3.5 Volba požadované drsnosti

Vzhledem k možnostem výroby se drsnost povrchu, stejně jako u tolerancí, volí jemnější u lépe obrobitelných prvků, to je u prvků majících charakter hřídele, kde se jedná o plochy vnější. Naopak u hůře zhotovitelných částí děr se volí drsnost s ohledem na možnosti provedení spíše hrubší. V případě ploch, které nemají funkční vlastnosti, se volí drsnost ekonomicky výhodněji. Povrch může také plnit další požadované vlastnosti jako je vzhled (požadovaná plocha s pravidelnými stopami nástroje), odolnost proti korozi (závisí především na tvaru nerovností), přizpůsobení pro zvolenou povrchovou úpravu a požadované vrubové pevnosti. Při zvolené drsnosti konstruktérem je nutností pro výrobu součástí, aby technolog zvolil vhodnou technologii výrobního postupu. [3]

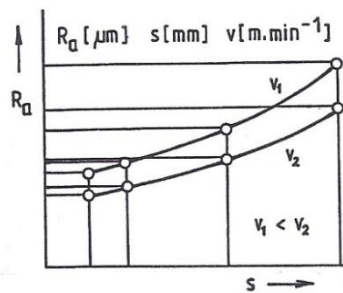
Znalost volby správných řezných podmínek funkčních ploch je důležitá pro předvídání nebo vyvarování se nepravidelností a poruch povrchu, které vzniknou během obrábění. Vyvolané vruby by mohly koncentrovat napětí při provozním zatížení a stát se iniciátorem poruch.

Ze zkušenosti si myslím, že řezné podmínky jsou technologem často voleny podle citu a zkušenosti. Konstruktor volí parametry podle zvyku a ze zkušeností firmy. Cílem obou je splnit a dodržet požadavek co nejjednodušeji, nejrychleji a nejehospodárněji. V sériové a hromadné výrobě se proces optimalizuje po obrobení prvních kusů.

### 2.3.6 Obrábění plastickou deformací materiálu

Vzhledem k drsnosti je nejdůležitější fáze obrábění – plastická deformace, při které obráběný materiál v poslední fázi odchází řezem ve formě třísky. Tento jev vytváří jeden z druhů lomu (trhlin), a proto lze výsledný povrch nazvat jako lomový za působení břitu nástroje na povrch obrobku. Výsledný povrch lze nazvat plochou lomovou. Vznik nového povrchu je způsoben především šířením trhliny před břitkem nástroje při působení na obráběný materiál. Lom vzniká dislokačním procesem atomů. Výsledný druh a charakter plochy závisí na výběru obráběného materiálu – krystalické mřížce a řezných podmínek obrábění. Nejvýznamnější z podmínek je řezná rychlost a teplota. Při zvýšení řezné rychlosti se lom stává nestabilním a za zpevňovacího mechanismu je křehký a štěpený. Zvýšení rychlosti způsobí navýšení teploty při plastické deformaci. Změna teploty způsobí změnu vlastností třísky a navýší se její tvárnost. Pokud je teplota dostatečně vysoká, dochází k plastické deformaci bez lomu a ke vzniku plynulé třísky. Výsledný vzhled povrchu je hladký a lesklý s potlačením tvorby trhlin. Při použití nízkých řezných rychlostí je lom stabilní a tvárný. Lom má charakter jamkový, kde dochází k vytrhávání částic z obráběného materiálu. Proces oddělování materiálu je řízen smykovým napětím a je výsledkem skluzového mechanismu. Vznik povrchu v závislosti na volbě druhu krystalické mřížky obráběného materiálu (BCC, FCC) a řezných rychlostech je dále rozveden v literatuře [2] od Docenta Bumbálka na str. 32. [2] [10]

Závislost drsnosti na posuvu a rychlosti nám ukazuje graf 3.



**Graf 3 - Závislost drsnosti povrchu  $R_a$  na posuvu  $s$  a rychlosti  $v$  [1]**

### 2.3.7 Obrobitelnost materiálu

Technologická nepřímá charakteristika, obrobitelnost strojních materiálů, je vztažena k problematice řezné rychlosti a není standardizovanou vlastností. Záležitost obrobitelnosti se výrazně projeví na výsledek jakosti, a to především na odchylky rozměrů, tvarů, polohy a drsnosti. Podle drsnosti materiálu lze klasifikovat třídění materiálů obrobitelnosti stejně jako podle řezné rychlosti. Odstupňování jednotlivých tříd probíhá pomocí součinitele obrobitelnosti s kvocientem například 1,26. Součinitel je stanoven poměrem drsnosti zkoušeného materiálu ke vzorovému etanolu. Vzhledem k různorodosti dokončovacích operací, zlepšování nástrojů je tato metoda zařazení materiálu velice komplikovaná. [2]

Další možností určení obrobitelnosti materiálu je kvalitativní metoda dle drsnosti. Je zde poměr mezi teoretickou a reálnou drsností. Tento poměr využijeme jako součinitel drsnosti. [5]

Z ekonomického hlediska lze obrobitelnost stanovit dle objemu obrobeného materiálu za určitý čas vztažený opět k řezné rychlosti. [4]

Přiřazení materiálů do tříd obrobitelnosti dle drsnosti povrchu je výhodné pro zvýšení kvality a jakosti strojních výrobků. Součinitel obrobitelnosti například  $k_{R/60}$  označuje vzhledem k indexu R, že je určen podle drsnosti povrchu, a to za řezné rychlosti 60 m/min. Správný odhad obrobitelnosti má pozitivní ekonomické výsledky při optimalizaci procesu výrobních linek. Je zde nutnost využití obráběcího stroje a nástroje na maximální dovolenou hodnotu, a neztrácet tak zisk zbytečným ohleduplným šetřením stroje, vzhledem k pořizovacím nákladům stroje, strojnímu času, nutnosti servisu, výměny nástrojů a budoucí obnově nových strojů. [2]

Obrábění vysoce legovaných ocelí a litin, keramiky, niklových a titanových slitin je složité vzhledem ke zvolení vhodných řezných podmínek. Trvanlivost obráběcího nástroje je snížena fyzikálními a mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu a nutností velkých sil pro obrobění součástí. Tento fakt může negativně ovlivnit integritu povrchu a následné funkční vlastnosti a životnost součástí. Nízká hodnota tepelné vodivosti materiálu způsobuje velký nárůst teploty při obrábění. S tímto negativním faktorem je nutno počítat. [4]

### 2.3.8 Příčiny geometrické nepravidelnosti [2]

- Drsností způsobenou volbou řezného nástroje.
- Drsností „kinematicko-periodickou“ vyvolanou rychlostí posuvu řezného nástroje a tvarem nástroje. Profil z profilogramu může být popsán periodickou funkcí.

- Drsností „rozpojovací-aperiodickou“ způsobenou řeznou rychlostí a způsobem oddělení třísky vzhledem k fyzikálním a mechanickým vlastnostem obrobku. Náhodný profil z profilogramu je popsán aperiodickou funkcí.
- Vlnitostí vyvolanou chvěním nástroje, nesprávným upnutím obráběného materiálu, jeho vlastnostmi a způsobem chlazení materiálu. Vznikem jiných vibrací, například nevyváženým brusným kotoučem, nepřesností vodících šroubů.
- Úchylkou tvaru způsobenou špatným upnutím, prohnutím obrobku, chybou ve vedení nástroje. Úchylka tvaru, jakožto největší nerovnost profilu, vzniká nezávisle na vlnitosti a drsnosti povrchu. Způsobuje chybu přímosti, rovnoběžnosti, válcovitosti, kruhovitost atd.
- Strukturálními změnami způsobenými krystalickými a korozními pochody.
- Změnami mřížky. Vznikají chemickými a fyzikálními pochody na povrchu materiálu nebo napětím v krystalické mřížce.

### 2.3.9 Doporučení pro zvýšení jakosti obrobeného materiálu

- Zvýšení řezné jakosti
- Snížení posuvu
- Volba většího rádiusu špičky řezného nástroje
- Výběr vhodné geometrie břitové destičky
- Úprava řezného prostředí vhodnou chladicí kapalinou
- Eliminace chvění

Každá technologická operace zanechává nerovnosti na nově vytvořeném povrchu. Čistě náhodný profil (izotropní) vzniká při různorodosti tvaru řezné plochy a kinematiky odebráním třísky. Tento jev se v dokonalé izotropní formě nevyskytuje, ale přiblížíme se k němu například při broušení, lapování a otryskávání, kde je charakter povrchu bez výrazné stopy nástroje. Mikrogeometrie povrchu je základní charakteristikou pro hodnocení povrchu a tento charakter se během životnosti povrchu mění. Vlastnosti povrchu jsou změněny nejen v době záběhu, ale i při ustáleném provozu. Během záběhu dochází k ustálení počáteční mikrogeometrie povrchu a k jejímu vyhlazení v případě některých míst. Během záběhu při středním zatížení se výšky nerovností sníží až na čtvrtinu i více. Během záběhu se také objeví poruchy, které původně při vytváření plochy nebyly viditelné. V době ustáleného provozu začínají působit negativní podmínky způsobující opotřebení a vedou až k deformaci funkčních ploch. Změny a poruchy v celém průřezu součásti mohou být způsobeny překročením únosnosti funkční plochy, a součást je třeba opravit nebo vyměnit. Měřicí přístroje dokáží změřit a vyhodnocovat i ty nejmenší změny a poruchy povrchu funkčních ploch během jejich zatížení. [10]

## 2.4 Teoretická drsnost

Vzhledem k požadavkům na obrobené plochy, týkajících se geometrie povrchu, je dobré vycházet z teoretické znalosti drsnosti, výsledku z geometrické a kinematické problematiky řezného nástroje a obráběného materiálu. Následující ukázky stanovení teoretické drsnosti jsou představeny na příkladu soustružení nástrojem s definovanou geometrií. Problematice se budeme věnovat pouze na ukázce prohlubní a vrcholů profilu drsnosti. V první části si ukážeme odvození vzorce pro výškový parametr  $R_z$ . [1]

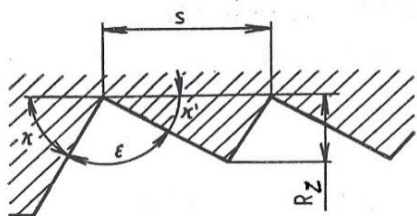
Pro výšku  $R_z$  na obrázku 2 platí:

$$s = R_z * \cotg(\kappa) + R_z * \cotg(\kappa')$$

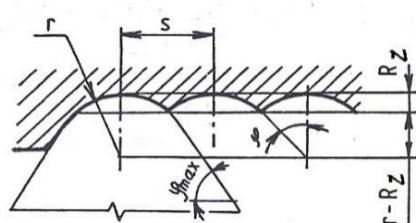
**Rovnice 1 - Největší výška profilu  $R_z$**

$$R_z = \frac{s}{\cotg(\kappa) + \cotg(\kappa')}$$

**Rovnice 2 - Vyjádření  $R_z$**



**Obrázek 2 - Velmi malý poloměr špičky [1]**



**Obrázek 3 - špička s poloměrem zaoblení  $r$  [1]**

Povrch na obrázku 2 je vytvářen nožem s hlavním a vedlejším ostřím bez poloměru zaoblení špičky. Tento výpočet má teoretický význam vzhledem k nemožnosti nože takového tvaru. Zmíněný vzorec se využíval pro výpočet teoretické drsnosti při hoblování a čelním frézování.

Pokud budeme brát v potaz soustružení nožem s poloměrem ostří  $r$ , platí výsledný vztah v rovnici 3 pro  $R_z$  – nejvyšší výška profilu.

$$R_z = r - \frac{1}{2} \sqrt{4r^2 - s^2}$$

**Rovnice 3 -  $R_z$  se zaoblenou špičkou nástroje**

Rovnice 3 se může použít na spočítání teoretické hodnoty drsnosti až do hodnoty stoupání dle rovnice 4 (podélný posuv).

$$s = 2 * r * \sin(\varphi)$$

**Rovnice 4 - Max hodnota stoupání**

Při zvýšení hodnoty posuvu uvedené v rovnici 4 bude povrch vytvářen také přímkovou částí ostří.

Teoretickou drsnost při použití malých posuvů ( $s \leq r$ ) jsme schopni spočítat jednoduchou rovnicí číslo 5.

$$R_z = \frac{f_n^2}{8 r_\epsilon}$$

**Rovnice 5 -  $R_z$**

- $R_z$  Drsnost obrobeného povrchu
- $f_n$  Posuv na otáčku
- $r_\epsilon$  Poloměr špičky nože

Za použití tohoto vztahu z rovnice 5 se ve výrobě počítalo správné zvolení posuvu vzhledem k žádané drsnosti povrchu, nebo se naopak počítala výsledná drsnost. Dnes jsme se s tímto vzorcem setkal v případě svislého frézování.  $f_n$  zaměníme za  $f_e$  posuv (krok) řádkování a místo poloměru pracujeme s průměrem frézy.

Ačkoliv rozdíly mezi teoretickou a skutečnou drsností povrchu mohou být značné, stanovení teoretické drsnosti nám může pomoci k předběžnému určení hodnoty, čímž lze přizpůsobit průběh obrábění požadovaným výsledkům.

Dnes jsem se při obrábění setkal s tím, že prodejci různých značek obráběcích nástrojů poskytují tabulky vycházející z následujících vzorců pro výpočet parametru  $R_z$  nebo  $R_a$ :

$$R_z = \frac{125f_{ot}^2}{r_e}$$

**Rovnice 6 -  $R_z$**

$$R_a = \frac{43,9f_{ot}^{1,88}}{r_e^{0,97}}$$

**Rovnice 7 -  $R_a$**

Vzorci se skládají z konstant a dvou parametrů – posuvu na otáčku a poloměru špičky ostří řezného nástroje. V případě frézování ve směru axiálního posuvu jsme schopni záměnou posuvu na otáčku za posuv na zub opět spočítat střední aritmetickou úchylku  $R_a$ . Z obou vzorců je patrné, že se zvyšujícím poloměrem špičky ostří se nám drsnost obrobeného povrchu snižuje.

#### **2.4.1 Faktory ovlivňující odchylku výsledné drsnosti od drsnosti teoretické**

Výsledná jakost obrobené plochy se od spočtené drsnosti liší vzhledem k těmto zasahujícím faktorům. Nejvýraznější vliv má materiál obrobku a materiál, stav a geometrie břitu (především poloměr špičky ostří), řezné prostředí a řezné podmínky. Mezi řezné podmínky ovlivňující výslednou jakost povrchu patří především posuv a řezná rychlost. Výběr tuhého obráběcího stroje vzhledem ke stabilitě soustavy stroj – nástroj – obrobek tvoří základní podmínku pro možnost uspokojivého výsledku. [11]

## **2.5 Historické značení drsnosti**

Značení drsnosti probíhalo v letech 1921-1950 za pomoci trojúhelníků. Jakost povrchu se tak předepisovala například ve Škodových závodech. Držela se normy ČSN 1033, která odpovídala mezinárodní dohodě ISA. Označení kroužkem značí povrch, který má být broušen. S postupem času se zjistilo, že značení prostřednictvím ▼ není dostatečně přesné. [9]

Tabulka 2 - Historické značení drsnosti povrchu [9]

|     |                           |                                                                                                                                            |                                                                                                                                            |                  |
|-----|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| ▽   | Hrubý obrobený povrch     | S přídavkem na obrábění. Soustruženo, frézováno, pilováno, hoblováno, vrtáno, broušeno. Způsob obrábění je určen podle potřebné přesnosti. | Plochy s hmatatelnými a okem zjištěitelnými stopami po nástroji. Např.: čelní plochy přírub, dosedací plochy ložisek, čelní plochy nábojů. | $Ra \approx 6,3$ |
| ▽▽  | Hladký obrobený povrch    |                                                                                                                                            | Plochy se stopami po nástroji, okem jen špatně zjištěitelnými. Např.: dosedací plochy jemnější s důrazem na vzhled.                        | $Ra \approx 3,2$ |
| ▽▽▽ | Nejhladší obrobený povrch | S přídavkem na obrábění. Jemně obrobený jakýmkoliv způsobem podle požadované přesnosti.                                                    | Plochy bez patrných stop nástroje. Obrobky s požadavkem na přesnost a perfektní vzhled. Např.: pístní čepy, vyvrtávání válců.              | $Ra \approx 0,8$ |

Tabulka 3 - Doplnkové značení obrobení broušením [9]

|      |                                                                                  |
|------|----------------------------------------------------------------------------------|
| ▽○   | Plochy broušené hrubě za účelem srovnání.                                        |
| ▽▽○  | Plochy broušené běžně se stupněm čistého broušení.                               |
| ▽▽▽○ | Plochy broušené jemně, s důrazem na přesnost rozměru obrobku a hladkost povrchu. |
| ○○   | Lapování, nejjemnější způsob broušení. Dobroušení a vyleštění výrobků na míru.   |

Z vlastní zkušenosti mohu říci, že některé společnosti toto značení používají dodnes. Například firma Okamoto vyrábí CNC brusky, kde se toto značení používá pro výběr programu způsobu broušení.

## 2.6 Povrch a jeho parametry (charakteristiky)

Správný způsob sledování a vyhodnocení mikrogeometrie povrchové vrstvy je základním faktorem zajištění životnosti, pevnosti, spolehlivosti a účinnosti strojních součástí. Vzhledem k požadavkům na funkční plochy je zavedeno mnoho parametrů drsnosti povrchu k zabezpečení věrohodného popisu. V důsledku přesnějšího popisu byly původně výškové charakteristiky doplněny charakteristikami podélnými a tvarovými. Konvenční profiloměry měří povrch dotykovým způsobem v normálové rovině ke zkoumanému povrchu. Tento hlavní způsob měření je doplňován způsobem optickým – bezdotykovým. Tato metoda vyhodnocuje povrch plošně. Podrobnější popis o metodách měření je v kapitole 2.8 Měření drsnosti. [1]

Dále se budu zabývat parametry drsnosti povrchu, jejich pojmy a definicemi základních geometrických charakteristik. Klasifikace povrchu drsnosti pomocí parametrů nám bohužel nestačí na úplný popis tvaru povrchu, ale poskytuje základní předpoklady funkce součásti za provozu. Pokud využijeme normalizovaných parametrů, jsme schopni docílit jasně definovaného měření. Kvantitativní měření drsnosti funkčních ploch nám slouží ke zvyšování jakosti, efektivnosti, životnosti, a především ke spolehlivosti výrobku. Je již na zkušenostech konstruktéra, které z parametrů jsou vhodné k měření a jejich zhodnocení vzhledem k požadované funkci plochy součásti. Vzhledem k výkonu dnešních přístrojů není často počet vyhodnocených parametrů omezen.



Hodnocení drsnosti povrchu je přesně charakterizováno v ČSN EN ISO 4287. Tato norma stanovuje názvy a definice. Jsou zde popsány výškové, podélné a tvarové charakteristiky povrchu.

Citovaná norma definuje 9 výškových charakteristik, 1 parametr drsnosti v podélném směru a 5 tvarových charakteristik.

### **2.6.1 Přehled a rozbor norem**

Struktura povrchu, definice parametrů a vhodné způsoby měření jsou součástí norem GPS (Geometrické požadavky na výrobky), ze kterých tato bakalářská práce vychází. Blíže je obsah norem popsán v následující kapitole. Součástí normy 4287 je nejen popis drsnosti povrchu, ale také vlnitosti a základního profilu, který s drsností povrchu souvisí. Drsnost povrchu je jen částí charakteristiky povrchu.

#### **2.6.1.1 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu ČSN EN ISO 4287 - 1997**

Norma ISO 4287 stanovuje názvy, termíny, parametry a definice v oblasti integrity povrchu jako je drsnost, vlnitost a primární profil získané za pomoci profilové metody. Vychází se zde ze znalosti filtru  $\lambda_c$  a  $\lambda_r$ . Profil drsnosti a jeho parametry uvádí jako řádně definovanou charakteristiku struktury povrchu. Periodický a náhodný profil ponechává na uživateli subjektivním názoru. Současná norma definuje 2D charakteristiky, do budoucna se chystají k zařazení charakteristiky 3D pro třírozměrné vyhodnocování povrchu. Norma ISO 4287 byla schválena 26. ledna 1998. Tato norma nahrazuje normu z roku 1993 (ČSN ISO 468) a 1984 (ČSN 01 4451). [12]

#### **2.6.1.2 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu ČSN EN ISO 4288 - 1996**

Norma ISO 4288 je všeobecná GPS norma (geometrické požadavky na výrobky). Norma stanoví pravidla při porovnávání hodnot s tolerančními mezemi definovanými pro parametry povrchu. Také stanoví pravidla výběru mezních vlnových délek cut-off  $\lambda_c$  pro parametry drsnosti povrchu, které jsou měřeny pomocí dotykových přístrojů ISO 3274. Mezní vlnové délky cut-off jsou dále popsány v kapitole: 2.6.2.17 - Mezní vlnová délka  $\lambda_c$  (cut-off). [6]

Tato norma nahrazuje původní první vydání z roku 1985. Zásadní rozdíl je ve výběru mezní vlnové délky cut-off. Nyní jsou hodnoty vybírány dle struktury povrchu obrobku, nikoliv dle údajů na výkresu. Tato norma popisuje posuzování parametrů profilu drsnosti a parametrů základního profilu. Tato norma byla schválena 2. listopadu 1997. [6]

#### **2.6.1.3 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů ČSN EN ISO 3274**

Norma ISO 3274 je mezinárodní normou GPS (geometrické požadavky na výrobky) a definuje obecnou strukturu dotykových měřících přístrojů pro měření drsnosti a vlnitosti povrchu. Poskytuje specifikace dotykových přístrojů a vlastností, které ovlivní měření struktury povrchu. [12]

## 2.6.2 Pojmy parametrů

Rozlišujeme dva druhy základních geometrických nepravidelností – makrogeometrii a mikrogeometrii. Mezi makrogeometrii zařazujeme odchylky tvaru a vlnitosti (makronerovnosti) a do mikrogeometrie patří drsnost povrchu (mikronerovnosti). Při měření drsnosti musíme zabezpečit, aby se nám do měření neprojevyly vlivy vlnitosti a úchylky tvaru. Toho docílíme zvolením správné základní délky, díky které z velké části odfiltrujeme ostatní faktory nepatřící do drsnosti povrchu. Vzdálenost nejvyšších a nejnižších výstupků vlnitosti je oproti drsnosti větší. Musíme také zvolit pro měření vlnitosti větší délku měřené dráhy. [3]

### 2.6.2.1 Základní profil

Je základem pro hodnocení parametru základního profilu. P-parametr je geometrický parametr vypočítaný ze základního profilu. Vyobrazen na obrázku 4 b). [12]

### 2.6.2.2 Profil drsnosti

Vznikne odvozením ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek za použití filtru profilu  $\lambda_c$  až  $\lambda_s$ . Z profilu drsnosti je vypočítaný R-parametr. Příklad je na obrázku 4 c). [12]

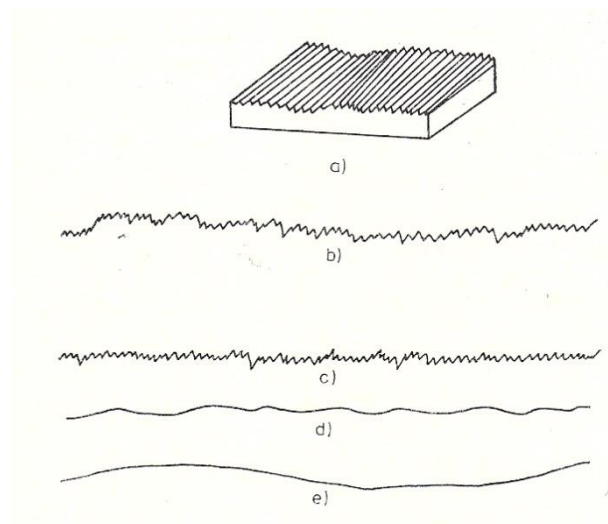
### 2.6.2.3 Profil vlnitosti

Tento profil vznikne při dosažení filtru o hodnotě  $\lambda_f$  potlačujícím dlouhovlnné složky a  $\lambda_c$  potlačujícím složky krátkovlnné. W-parametr vypočteme z profilu vlnitosti. Za vlnitost považujeme větší nerovnosti než drsnost. Na vlnitosti je superponovaná (navrstvená) drsnost. Na obrázku 4 d) je zobrazen profil vlnitosti. [12]

Tuto znalost geometrických parametrů využijeme při určení typu vyhodnocovaného profilu parametru. Například parametr  $R_a$  je vypočítán z profilu drsnosti (roughness) a parametr  $P_t$  je vypočítán ze základního profilu.

V praxi se rozložení drsnosti, vlnitosti a úchylek tvaru bere s ohledem na velikost součásti – povrchu. Příkladem může být drsnost hřídele, která v případě například hřídelky hodinového strojku může být považována za vlnitost. Rozteč nerovností má vliv na výsledné klasifikování nerovnosti. Například nerovnost tvaru u malé hřídelky, která byla definovaná jako úchylka tvaru, může být s větším počtem takových stejně velkých nerovností u velké hřídele brána za vlnitost. Proto je vhodné nerovnosti povrchu klasifikovat dle důvodů jejich vzniku, viz kapitola 2.3 Obrábění povrchu. [13]

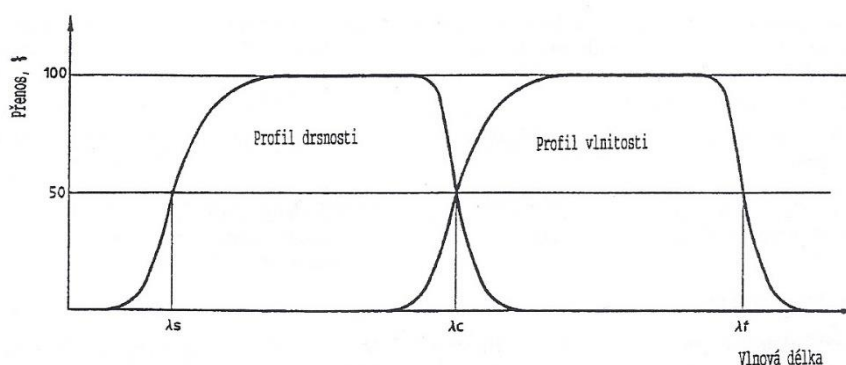
Na obrázku 4 e) je zobrazena odchylka tvaru povrchu.



**Obrázek 4 - Profily [2]**

#### 2.6.2.4 *Filtr profilu*

Tento základní prvek pro měření parametrů rozděljuje profil na dlouhovlnné a krátkovlnné složky. Používají se zde tři filtry definované dle ISO 11562, které mají dle obrázku 5 stejné přenosové charakteristiky, ale hodnoty mezních vlnových délek jsou různé. Můžeme se setkat s textovým ekvivalentem  $\lambda_s = L_s$  a dále. [12]



**Obrázek 5 – Vlnové délky [12]**

#### 2.6.2.5 $\lambda_s$ *filtr profilu*

Tento filtr definuje rozdíl mezi drsností a menšími složkami nerovností povrchu. [12]

#### 2.6.2.6 $\lambda_c$ *filtr profilu*

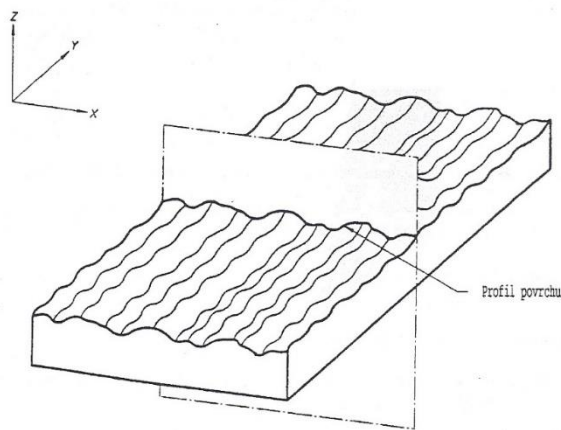
Definuje rozhraní mezi problematikou drsnosti a vlnitosti. [12]

#### 2.6.2.7 $\lambda_f$ *filtr profilu*

Tento filtr nám rozděljuje interval mezi vlnitostí a delšími složkami vad povrchu. [12]

#### 2.6.2.8 *Souřadnicový systém*

Souřadnicový systém nám definuje parametry struktury povrchu. Je zde používán pravoúhlý souřadnicový systém s pravotočivou kartézskou soustavou, kde osa X je rovnoběžná se střední čarou, osa Y je ve směru skutečného povrchu a osa Z nám vymezuje prostor mezi povrchem a okolím, viz obrázek 6. Profil povrchu vznikne proložením ploch v osách XZ. [12]

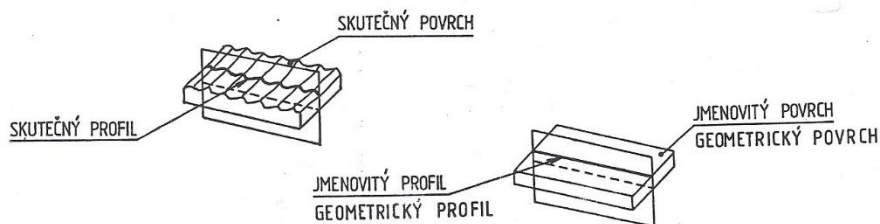


**Obrázek 6 – Souřadnicový systém [12]**

#### 2.6.2.9 Geometrický jmenovitý povrch

Tento povrch má dokonalé vlastnosti a jeho tvar je určen technickou dokumentací, například výkresem. [1]

U výsledného výrobku se setkáváme se skutečným povrchem ohraničujícím vyrobenou součást.



**Obrázek 7 – Skutečný a jmenovitý profil [1]**

#### 2.6.2.10 Skutečný povrch

Skutečný povrch je plocha tvořena hranicí mezi tělesem a okolím. Charakter drsnosti se může lišit v jednotlivých směrech měření. Reálný povrch obsahuje nerovnosti v různé míře a o různé velikosti. Je tvořen kombinací drsnosti, vlnitosti a úchylek tvaru. [1]

#### 2.6.2.11 Příčný profil

Tento profil nám vznikne, proložíme-li povrch rovinou kolmou ke směru drsnosti povrchu. Příklad je na obrázku 8. [1]

#### 2.6.2.12 Podélný profil

Podélný profil vznikne, použijeme-li rovinu ve směru nerovností zkoumaného profilu. To znamená, že nerovnosti musí mít převládající směr výskytu. [1]



**Obrázek 8 – Příčný a podélný profil [1]**

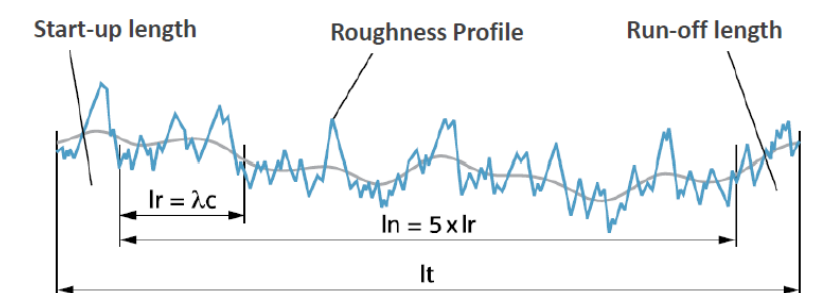
### 2.6.2.13 Základní čára

Jako základní čáru označujeme čáru, ke které se vyhodnocují parametry nerovností povrchu. [1]

### 2.6.2.14 Základní délka $l$

Základní délka se užívá pro posouzení nerovností ve vyhodnocované délce, která je v souřadnicovém systému ve směru osy X. Základní délky by měly mít stejný rozměr. Základní délka by měla být dostatečně dlouhá, aby respektovala měření drsnosti a zároveň přiměřeně krátká, aby se vyloučilo snímání větších geometrických úchylek – vlnitosti. [12]

Tato filtrace může být provedena mechanicky, určená parametry snímače, kde největší vliv má jeho poloměr zaoblení snímacího hrotu, poloměr zaoblení opěrné patky a vzájemná vzdálenost snímacího hrotu a opěrné patky. Touto konfigurací zajistíme, že snímač funguje jako filtr sám o sobě. V případě profilometru je užití elektrického filtru k základní délce dáno vlnovou délkou. Dnes často používaná digitální filtrace je možná za pomoci softwaru, který využívá Fourierovy diskrétní transformace. Pomocí různých úrovní propustí jsme schopni odfiltrovat jednotlivé nerovnosti profilu a ty dále zkoumat. Digitální filtry nejsou fyzicky limitovány a filtrace je možná podle libovolně nastavené základní délky. Pro zabezpečení obdobných výsledků je potřeba filtraci provádět podle normou stanovených základních délek. Výběr vhodných základních délek obsahuje norma ČSN EN ISO 4288. V případě základní délky drsnosti se může dle vydání normy z roku 1997 značit  $l_r$ . [2]



Obrázek 9 – Základní délka [14]

Rozměr základní délky a následná odpovídající vyhodnocovaná délka, se volí podle odhadu rozměru měřeného parametru, dle tabulky z norem [12] pro periodické a neperiodické profily. Většinou se volí z délek: 0,08 0,25 0,8 2,5 8,25 mm.

S výjimkou parametrů  $R_t$  a  $R_{mr}$  jsou všechny parametry drsnosti vztahovány k základní délce.

### 2.6.2.15 Vyhodnocovaná délka $l_n$

Tato délka určuje rozměr, na kterém vyhodnocujeme zkoumanou drsnost. Vyhodnocovaná délka obsahuje jednu nebo více základních délek. Vyhodnocovaná délka  $l_n$  je rovna délce základní délky pro základní profil  $l_p$  a je v souřadnicovém systému ve směru osy X. [1]

Vzorec 8 vypovídá o poměru vyhodnocované délky vzhledem k základní délce.

$$l_n = \sum_{i=1}^{i=m} l_i$$

**Rovnice 8 –  $l_n$**

V případě měření parametru drsnosti za použití normalizované vyhodnocované délky, tj. pěti základních délek ( $l_n=5 \cdot l$ ), není potřeba zapisovat tuto délku indexem. Při měření parametru v jiném počtu základních délek zde musíme uvést index, například  $Rz_3$ . [3]

#### 2.6.2.16 Délka měřeného úseku $l_t$

Tato délka slouží pro vyhodnocení profilu drsnosti. Délka obsahuje jednu nebo více základních délek, a navíc vzdálenost pro rozběh a doběh doteku, které vylučují mechanické a elektrické nestability měření. [15]

#### 2.6.2.17 Mezní vlnová délka $\lambda_c$ (cut-off)

Zesilovače měřícího přístroje jsou vybaveny filtračním zařízením filtrujícím nechtěné nerovnosti. Zvolení správné mezní vlnové délky jako parametru měřícího přístroje je velmi důležité při měření drsnosti. Tato funkce profilometru upravuje převod profilu povrchu na elektrický signál. Omezení vlnové délky  $\lambda_c$  redukuje citlivost výškových špiček drsnosti. Ve výsledku se naměří takové nerovnosti, které jsou menší než mezní vlnová délka, tedy například ve velkých odstupech. Hodnota 0,8 mm je hodnota mezní vlnové délky, která se používá pro většinu druhů povrchů, ale ne vždy je vyhovující. Pokud je základní délka vyjádřena hodnotou na výkrese, mezní vlnová délka cut-off je vybrána vzhledem k této základní délce. Případně se volí dle předpokládané drsnosti a charakteru struktury kontrolovaného. S nástupem dnešních procesorů se používá filtr PC50 – Gaussův filtr, který zkresluje oproti jiným filtrům méně (RC). [15]

#### 2.6.2.18 Úchylka profilu $y$

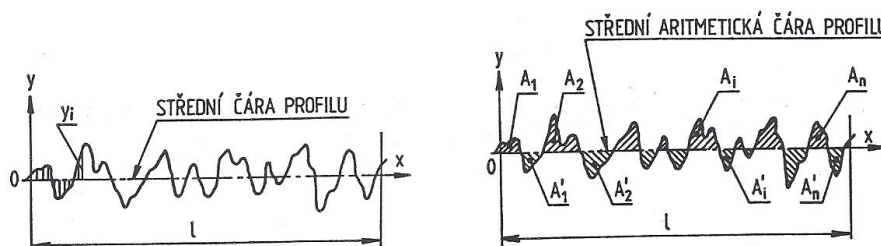
Úchylka profilu je kolmá vzdálenost mezi naměřeným povrchem a základní čarou. [3]

#### 2.6.2.19 Střední čára nejmenších čtverců profilu – střední čára – $m$

Tato základní čára vznikne rozdělením skutečného profilu v rozsahu základní délky, součtem druhých mocnin úchylek profilu tak, aby součet po obou stranách byl co nejmenší. Viz rovnice 9.

$$\int_0^l y^2 dx = \min$$

**Rovnice 9 – Střední čára nejmenších čtverců**



**Obrázek 10 – Střední (aritmetická) čára profilu [1]**

#### 2.6.2.20 Střední aritmetická čára profilu – centrální čára

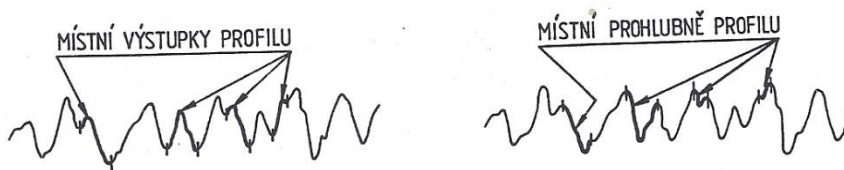
Tuto základní referenční čáru sestojíme v rozsahu základní délky tak, že rozdíl ploch po obou stranách je roven nule a referenční čára je rovnoběžná se směrem skutečného profilu. Viz rovnice 10. [3]

$$\sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n A'_i$$

Rovnice 10 – Střední aritmetická čára profilu

#### 2.6.2.21 Místní výstupek profilu

Jak je z obrázku 11 patrné, tento pojem označuje místo skutečného povrchu, které leží mezi dvěma sousedními prohlubněmi povrchu. [1]



Obrázek 11 – Místní výstupek a prohlubeň profilu [1]

#### 2.6.2.22 Místní prohlubeň povrchu

Jako místní prohlubeň povrchu označujeme místo skutečného povrchu, které se nachází mezi dvěma sousedními nejvyššími body povrchu. [1]

#### 2.6.2.23 Nerovnost profilu

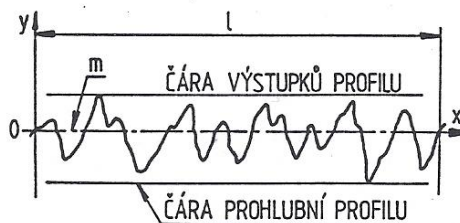
Tvořena částí skutečného povrchu výstupku a prohlubně, ohraničená a tvořena střední čarou.

#### 2.6.2.24 Drsnost povrchu

Je to soubor nerovností různého druhu vzhledem k použití technologie výroby.

#### 2.6.2.25 Čára výstupků profilu

Tato čára je rovnoběžná se střední čarou profilu procházející nejvyšším výstupkem skutečného profilu v měřené základní délce. Viz obrázek 12. [1]



Obrázek 12 – Čára výstupků a prohlubní profilu [1]

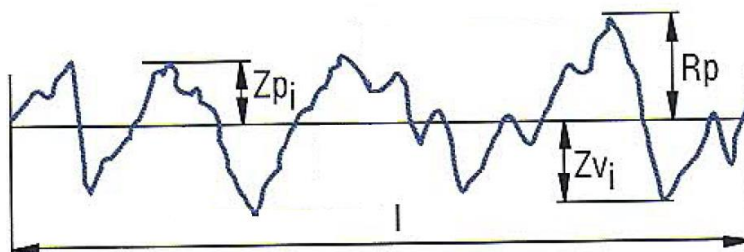
#### 2.6.2.26 Čára prohlubní profilu

Čára paralelní se střední čarou profilu nacházející se v průsečíku nejnižší prohlubně v intervalu základní délky. [1]

## 2.6.3 Základní parametry drsnosti povrchu – ve směru osy Z (výškové)

### 2.6.3.1 Největší výška výstupku profilu $R_p$ (ČSN EN ISO 4287)

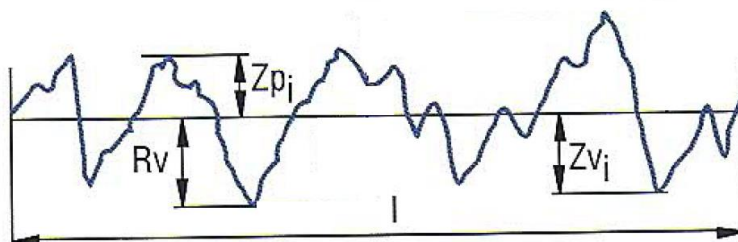
Tento parametr je určen nejvyšším prvkem výstupku profilu v rozsahu základní délky  $l$ . Parametr  $R_p$  je určen délkou od střední čáry s nejvyšším bodem měřeného profilu, jak je zobrazeno na obrázku 13. [12]



Obrázek 13 –  $R_p$  [12]

### 2.6.3.2 Největší hloubka prohlubně profilu $R_v$ (ČSN EN ISO 4287) $R_m$ (1984)

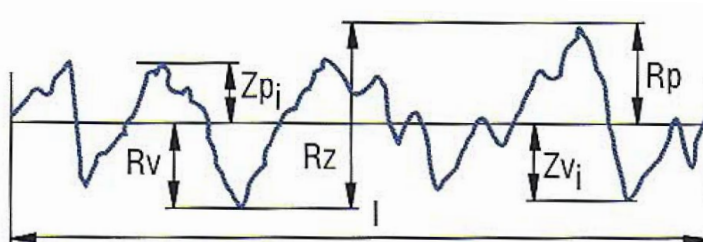
Parametr  $R_v$  je určen vzdáleností mezi střední čarou a nejnižším bodem prohlubně skutečného povrchu označeného jako  $Z_v$  na základní délce. Vyobrazeno na obrázku 14. [12]



Obrázek 14 –  $R_v$  [12]

### 2.6.3.3 Maximální výška profilu $R_z$ (ČSN EN ISO 4287) $R_y$ (1984)

Tato výšková charakteristika  $R_z$  je definována jako součet mezi čarou nejvyššího vrcholu  $R_p$  a čarou nejnižší rýhy profilu  $R_v$  v rozsahu základní délky  $l$ . Udává pouze největší rozdíl nerovností měřené plochy v intervalu základní délky. Pro funkční vlastnosti plochy má tento parametr malý význam, využívá se jako doplňující parametr pro představu drsnosti. Jedna hlubší rýha silně ovlivní výsledek jinak hladkého broušeného povrchu. Je zde vhodné několikanásobné měření. [12]



Obrázek 15 –  $R_z$  [12]

$$R_z = R_p + R_v$$



V ISO 4287-1:1984 (ČSN 01 4451) byl parametr  $R_z$  definován jako výška nerovností z deseti bodů. Z tohoto důvodu se doporučuje důsledná kontrola starších přístrojů na měření drsnosti a přiměřená pozornost tomuto parametru v technické dokumentaci a výkresech. Možná záměna těchto dvou charakteristik a následně získané výsledky se vyznačují značným rozdílem hodnot.

V případě parametru  $R_{zi}$  jej bereme jako průměrnou výšku profilu popsanou rovnicí 12. [16]

$$R_{zi} = \frac{R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}}{5}$$

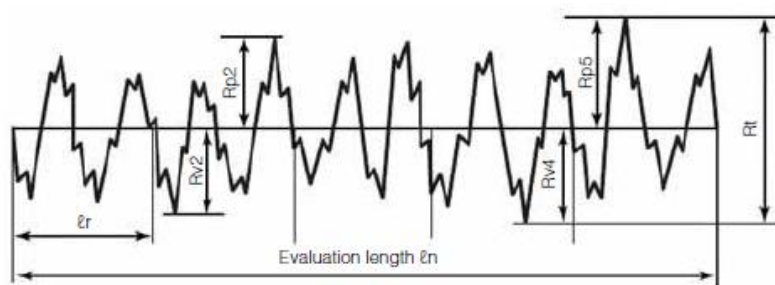
Parametr  $R_z$  bychom zde brali jako jednu vybranou hodnotu výškového parametru na vybrané základní délce. Oba tyto parametry se velmi často zaměňují. Proto je vhodné se při volbě tohoto parametru zabývat tím, jakou rovnicí je parametr popsán.

$R_{z1max}$  je parametr, který poskytuje hodnotu největší z pěti hodnot  $R_z$  vyhodnocovaných po pěti základních délkách  $l$  na měřené délce. Na stejném principu je vyhodnocen i parametr  $R_{max}$ .

#### 2.6.3.4 Celková výška profilu $R_t$ (ČSN EN ISO 4287)

Tento parametr stanovíme součtem nejvyššího výstupku  $R_p$  a nejnižší hloubky  $R_v$  v rozsahu vyhodnocované délky. Vzhledem ke znalosti rozdílu základní a vyhodnocované délky [12] zde platí vztah 13.

$$R_t \geq R_z$$



Obrázek 16 –  $R_t$  [12]

V mnoha případech platí:

$$R_z = R_t$$

a tudíž použijeme  $R_t$ .

Jak je zřejmé, parametr  $R_t$  není určen střední čarou a jeho hodnota je ovlivněna rýhami, vadami a nečistotami povrchu.

### 2.6.3.5 Výška nerovností profilu z deseti bodů $R_y$

Tento parametr se počítá z absolutních hodnot pěti nejvyšších vrcholů a pěti nejnižších prohlubní profilu na základní délce a z nich spočtené střední hodnoty. Dnes již tento parametr je v normě ISO vynechán. [12]

$$R_y = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vmi}|}{5}$$

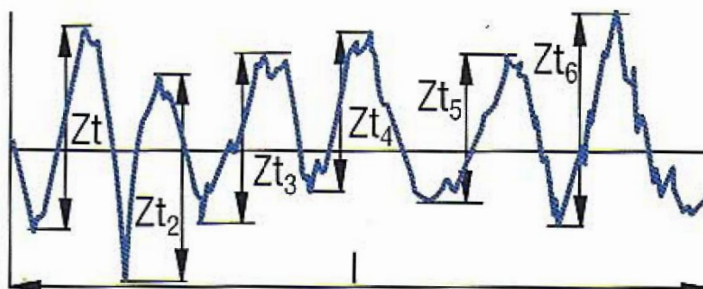
Rovnice 15 -  $R_y$

### 2.6.3.6 Průměrná výška prvků profilu $R_c$ (ČSN EN ISO 4287)

Tento parametr nám poskytuje aritmetický průměr výšek  $Z_t$  na rozsahu základní délky. Z rovnice 16 a obrázku 17 je patrné, že  $R_c$  je definován výškou prvku profilu  $Z_t$  jako součet absolutní hodnoty výšky vrcholu a hloubky prohlubně, který je následně vydělen počtem těchto prvků. [12]

$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{t_i}$$

Rovnice 16 -  $R_c$



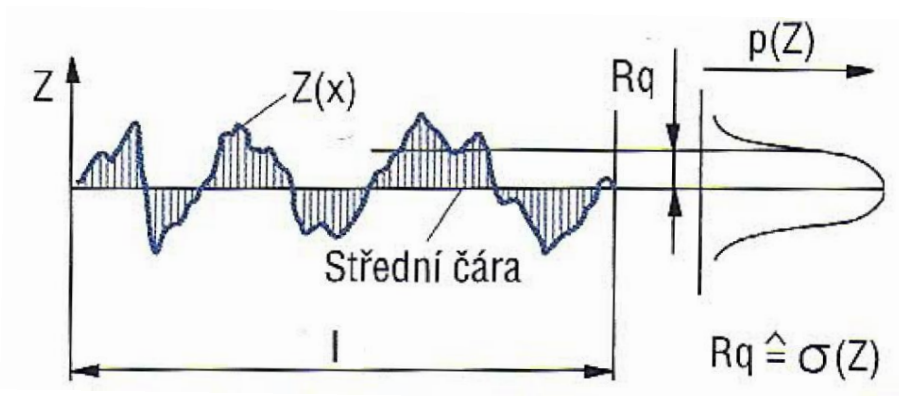
Obrázek 17 –  $R_c$  [12]

### 2.6.3.7 Střední kvadratická úchylka drsnosti $R_q$ (ČSN EN ISO 4287)

Parametr  $R_q$  je střední kvadratickou hodnotou úchylek filtrovaného profilu v rozsahu základní délky  $l$ . Při statistickém pozorování má parametr  $R_q$  vysoký význam, jelikož odpovídá standardní průměrné odchylce profilových souřadnic. [12]

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx}$$

Rovnice 17 -  $R_q$

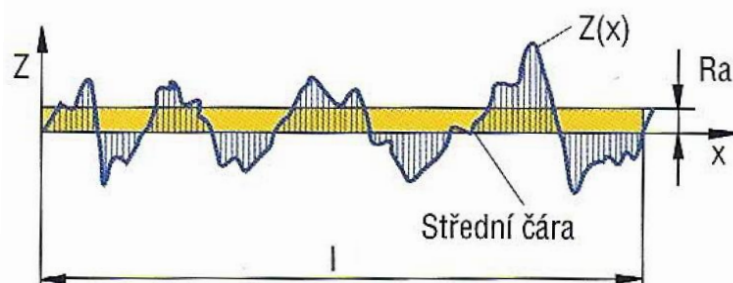


Obrázek 18 – Rq [12]

Mezi první měřicí přístroje patřil Abbottův profiloměr, který prováděl měření hodnoty  $R_q$  snímáním hrotem kolmo k obrobenému profilu. Zpočátku byl vybaven pouze integračním odečtem hodnot, později bylo součástí zapisovací zařízení.

#### 2.6.3.8 Střední aritmetická úchylka profilu $R_a$ (ČSN EN ISO 4287)

Střední aritmetická úchylka profilu je parametr povrchu velmi používaný v České republice. Tento standard se používá především pro svoji jednoduchost měření a přesnost opakovaného měření. Tento výškový parametr vypovídá o střední hodnotě vzdáleností od střední čáry, jinými slovy to je aritmetický střed absolutních odchylek filtrovaného profilu drsnosti od střední čáry na měřeném rozsahu základní délky  $l$ . Tato charakteristika se zobrazuje výškou obdélníku sestaveného na střední čáře o totožném obsahu jako nerovnosti profilu ohraničené profilem a střední čarou. Tato ryze statistická hodnota má velmi nízkou vypovídající schopnost o skutečné drsnosti povrchu. Je to způsobené zanedbáním rozlišení mezi extrémními výstupky a prohlubněmi, tudíž je zde možný i jiný tvar povrchu. Z toho vyplývá, že u dvou zkoumaných povrchů se stejnou hodnotou  $R_a$  je možné jiné chování v problematice funkční spolehlivosti a životnosti vzhledem k výskytu, například trhlin. Doporučení norem provádět měření povrchu alespoň na pěti základních délkách a výsledky zprůměrovat přináší reprezentativnější výsledky. Správné posouzení hodnoty parametru  $R_a$  lze pouze se správným zvolením a uvedením základní délky. Pro statické zhodnocení drsnosti má střední kvadratická úchylka drsnosti lepší vypovídající hodnotu. [1]



Obrázek 19 – Ra [17]

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$$

Rovnice 18 - Ra

Typické hodnoty parametru  $R_a$  v závislosti na jemném (J), běžném (B) a hrubovacím (H) obrábění viz Tabulka 4.

Tabulka 4 - Způsob obrábění –  $R_a$  [1]

| Způsob obrábění              | Dosažitelná drsnost $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ] |             |            |          |         |         |         |         |         |         |          |         |        |
|------------------------------|---------------------------------------------|-------------|------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|--------|
|                              | 0-0,012                                     | 0,012-0,025 | 0,025-0,05 | 0,05-0,1 | 0,1-0,2 | 0,2-0,4 | 0,4-0,8 | 0,8-1,6 | 1,6-3,2 | 3,2-6,3 | 6,3-12,5 | 12,5-25 | 25-... |
| Soustružení                  |                                             |             |            |          |         | J       | J       | J       | B       | B       | H        | H       | H      |
| Vyvtávání                    |                                             |             |            |          |         | J       | J       | J       | B       | B       | H        | H       |        |
| Broušení do kulata v hrotech |                                             |             | J          | J        | J       | J       | B       | B       | B       | H       |          |         |        |
| Broušení bezhroté            |                                             |             |            | J        | J       | J       | J       | J       | J       |         |          |         |        |
| Broušení vnitřní             |                                             |             | J          | J        | J       | J       | B       | B       | B       | H       |          |         |        |
| Broušení na plochu obvodové  |                                             |             | J          | J        | J       | J       | B       | B       | B       | H       |          |         |        |
| Broušení na plochu čelní     |                                             |             | J          | J        | J       | J       | B       | B       | B       | H       |          |         |        |
| Hoblování a obrážení         |                                             |             |            |          |         |         |         |         | B       | B       | B        |         |        |
| Protahování                  |                                             |             |            |          |         | J       | J       | B       | B       | H       |          |         |        |
| Vrtání šroubovým vrtákem     |                                             |             |            |          |         |         |         |         |         | J       | B        | B       |        |
| Vrtání speciálním vrtákem    |                                             |             |            |          |         |         | J       | J       | B       | B       |          |         |        |
| Vystružování                 |                                             |             |            |          |         |         | J       | B       | B       | B       | H        |         |        |
| Frézování čelní              |                                             |             |            |          |         |         |         | J       | B       | B       | B        | H       | H      |
| Frézování válcovou frézou    |                                             |             |            |          |         |         |         |         | J       | B       | B        | B       | H      |
| Lapování                     | J                                           | J           | J          | B        | B       | B       |         |         |         |         |          |         |        |
| Honování                     |                                             |             | J          | J        | B       | B       |         |         |         |         |          |         |        |
| Superfinišování              |                                             |             | J          | J        | B       | B       |         |         |         |         |          |         |        |
| Pilování                     |                                             |             |            |          |         |         |         | J       | B       | B       | B        |         |        |
| Řezání pilou                 |                                             |             |            |          |         |         |         |         |         |         | B        | B       | B      |
| Řezání strojní pilou         |                                             |             |            |          |         |         |         |         |         | B       | B        | B       | B      |
| Řezání plamenem              |                                             |             |            |          |         |         |         |         |         |         |          |         | B      |

Dále mezi výškové parametry se zprůměrovanými hodnotami patří:

- šikmost posuzovaného povrchu  $R_{sk}$  (ČSN EN ISO 4287)
- špičatost posuzovaného povrchu  $R_{ku}$  (ČSN EN ISO 4287)

Tyto parametry jsou důležité pro funkci povrchu a během provozu součásti se mění. Parametr šikmosti nám velmi výrazně rozdělí povrch se stejnou hodnotou  $R_a$ , ale s rozdílným tvarem profilu. U materiálů s vysokou koncentrací pórů, jako jsou litiny a slinuté karbidy, dosahujeme u parametru šikmosti vysokých hodnot. Pro příklad si uvedeme, že u povrchu s kladnou hodnotou šikmosti ( $+R_{sk}$ ) docílíme lepší přilnavosti u nanášení ochranných laků a nátěrů. Oproti tomu záporná šikmost s malým množstvím výstupků povrchu, které se rychle opotřebí, je vhodná pro nosné plochy. Tyto parametry jsou vzájemně závislé a velmi snadno ovlivnitelné náhodnými výstupky a nečistotami. [18]

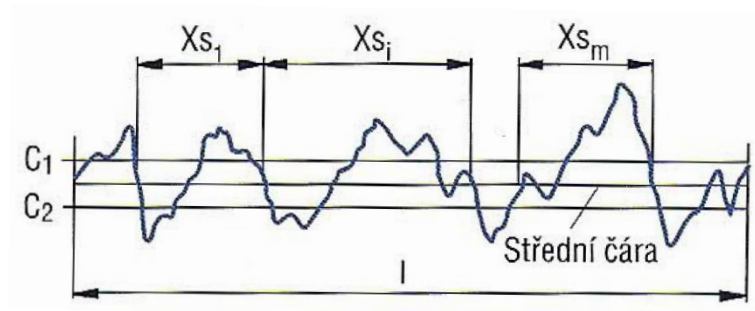
O těchto charakteristikách se více dozvíte v Normě ISO 4287 [12].

## 2.6.4 Základní parametry drsnosti povrchu – ve směru osy x (podélný směr)

### 2.6.4.1 Průměrná šířka prvků profilu $R_{Sm}$ (ČSN EN ISO 4287)

Střední rozteč nerovností profilu využíváme pro frekvenční (délkové) hodnocení drsnosti povrchu. Tato metoda měření zkoumá střední hodnotu roztečí nerovností profilu, které leží v rozsahu vyhodnocované základní délky. Skládá se z úseku střední čáry profilu ohraničující nerovnost profilu. Hodnota střední rozteče nerovností se při obrábění soustružením rovná posuvu. [12]

Rovnice 19 střední rozteče nerovností vychází z obrázku 20.



Obrázek 20 –  $R_{Sm}$  [12]

$$R_{Sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{Si}$$

Rovnice 19 –  $R_{Sm}$

Proměnná  $m$  je počtem nerovností na základní délce  $l$ .

## 2.6.5 Tvarové parametry povrchu - hybridní

### 2.6.5.1 Nosný podíl profilu – $R_{mr}(c)$ (ČSN EN ISO 4287) $t_p(1984)$

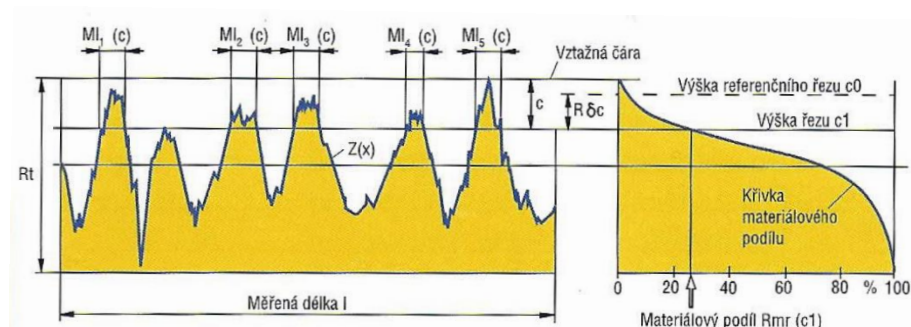
Tento parametr vyjadřuje poměr nosné délky profilu v rozsahu základní délky.

Výsledný procentuální podíl materiálu je tvořen součtem délek materiálových přímk  $MI(c)$  ve zvolené výšce profilu na délce základní. Matematicky to lze vyjádřit jako funkci podílu materiálu v závislosti na zvolené výšce řezu. [12]

Například  $R_{mr}(30)$  nám říká, že poloha řezu  $C$  je ve 30 % od největší výšky nerovností  $R_t$  (od výšky referenčního řezu  $C_0$ ). Zjišťovaný podíl profilu spočtený dle rovnice 20 je uveden v procentech, například:  $R_{mr}(30)=40\%$ . [1]

$$R_{mr}(c) = \frac{100}{l} \sum_{i=1}^m MI_i(c) = \frac{MI(c)}{l}$$

Rovnice 20 –  $R_{mr}(c)$



**Obrázek 21 – Rmr(c) [12]**

Délka MI značí nosnou délku profilu, součet délek úseků v určité výšce řezu, rovnoběžnou se střední čarou profilu. Vyhodnocení probíhá na základní délce. U tvarově rozdílných povrchů lze v určité výšce dosáhnout stejného nosného podílu. Proto naměřením více hodnot nosného podílu v různých výškách si lze vytvořit lepší představu a sestavit nosnou křivku profilu závislou na výšce měření. Křivka podílu materiálu znázorňuje podíl materiálu jako funkci výšky řezu profilu a je dále rozvedena v následující kapitole. [2]

#### 2.6.5.2 Nosná křivka profilu

Je grafickým znázorněním závislosti hodnot relativní délky profilu na poloze řezu profilu. Viz Abbott Firestoneova křivka na obrázku 21 výše. Tato křivka je velmi důležitým ukazatelem pro klasifikaci povrchu. Abbottova křivka nám prezentuje z obecného profilu drsnosti průměrný, takzvaně modelový tvar profilu s určitou nepřesností. [1]

Ze dvou na sobě kolmých směrů (příčný a podélný) jsme za pomoci nosného podílu schopni vytvořit si objektivní představu o charakteru povrchu. Popis drsnosti povrchu za pomoci nosného podílu, a z toho vyplývající nosné křivky profilu, jsou často používané a vypovídající způsoby měření. Měření ale probíhá za pevně daných předpokladů, které lze jen problematicky dodržet. To vede ke zjednodušení ve stanovení příčné a podélné drsnosti s ohledem na směr stop po nástroji, které způsobuje chyby měření. Tento parametr nám dává reprezentativní informaci v ohledu funkčních vlastností pro posuzování stykových ploch a doby záběhu, problematiky tření, způsobu mazání a doby opotřebení. [2]

#### 2.6.5.3 Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu $R_{\Delta q}$ (ČSN EN ISO 4287)

Tento tvarový parametr vznikne jako kvadratický průměr sklonů pořadnic  $dZ/dX$  na základní délce. Hodnota parametru, velikosti místního sklonu, je závislá na rozteči pořadnic. Parametr je dobrým vodítkem pro posuzování funkčních vlastností, kde může mít vypovídající hodnotu o pružnosti a tvrdosti, náchylnosti na otláčení a optické vlastnosti. Nízká hodnota  $R_{\Delta q}$  má v optice vysokou odrazivost. Textový ekvivalent zápisu je:  $R_{dq}$ . [12]

$$R_{\Delta q} = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \left( \frac{dZ(x)}{dX} \right)^2 dx}$$

**Rovnice 21 –  $R_{\Delta q}$**

#### 2.6.5.4 Délka rozvinutého profilu $L_0$

Tato charakteristika je získána linearizováním drsnosti reálného povrchu v intervalu základní délky do přímky. Daný parametr se využívá pro posuzování plochy při nanášení ochranného nátěru. [1]

#### 2.6.5.5 Relativní délka profilu $l_0$

Relativní délku profilu  $l_0$  získáme poměrem rozvinutého profilu  $L_0$  vzhledem k základní délce. Tato charakteristika je vhodná pro klasifikaci povrchu vzhledem ke korozi a případnému nanášení ochranného nátěru. Relativní délka profilu se hodnotí dle rovnice 22.

$$l_0 = \frac{L_0}{l}$$

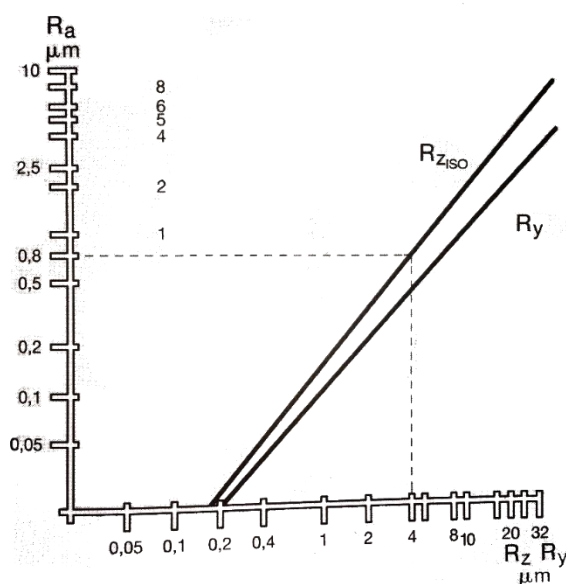
**Rovnice 22 - 10**

Mezi další tvarové parametry popsané v ISO normě 4287 patří:

- Rozdíl výšky úseku profilu  $R_{\delta c} = R_{dc}$

#### 2.6.6 Vzájemná souvislost mezi parametry

Mezi některými parametry je možnost hledat více či méně přesné vzájemné souvislosti. V případě  $R_a$  je možné říci, že maximální výška profilu  $R_z$  je čtyřikrát větší. Tuto závislost nám ukazuje graf 4. Znalost závislostí nám výrazně pomůže zvolit hodnotu parametru vzhledem k požadovaným funkčním vlastnostem. [3]



**Graf 4 - Převod  $R_a$  –  $R_z$  [3]**

### 2.7 Typické číselné hodnoty parametru $R_a$

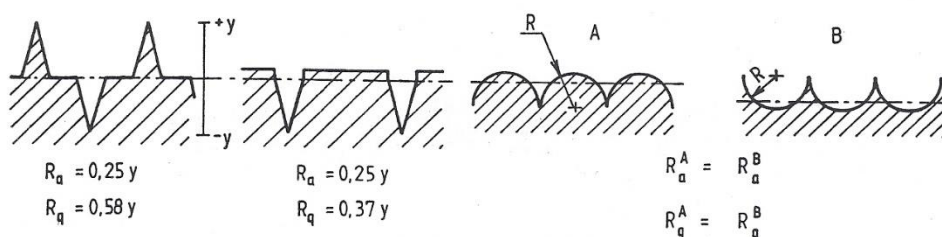
Jednotky parametrů drsnosti výškových i podélných jsou  $\mu\text{m}$ , v případě nosného podílu je výsledek v procentech.

Parametrů drsnosti povrchu využíváme, máme-li nárok na přesně definovanou drsnost součásti s cílem kontroly, bez ohledu na způsob výroby součástí. Parametr drsnosti povrchu se nevztahuje na součásti poškozené například rýhami, prohlubněmi,



vybouleninami, otřepy, naraženinami, vyvýšeninami nebo vadami materiálu jako jsou trhliny a póry. Parametry drsnosti lze případně vyhodnocovat v určitých částech povrchu materiálu, například mezi póry. Drsnost se nekontroluje, pokud nejsou definovány požadavky na drsnost povrchu. [2]

Požadovaná drsnost se určuje jedním nebo několika parametry, číselnou hodnotou spjatou s jednotkou a základní délkou, na které budeme vyhodnocovat. Střední aritmetická úchylka povrchu  $R_a$ , udávající střední hodnotu vzdáleností od střední čáry, není vždy vypovídající. Podívejme se na obrázek 22, z něhož je patrna stejná hodnota drsnosti parametru  $R_a$ , která má ale naprosto jiný charakter drsností povrchu, a to nám může ovlivnit funkci plochy součásti. Tento parametr se používá především z hlediska opakovaného měření, ačkoliv o představě povrchu nevypovídá. [2]



**Obrázek 22 – Různý tvar, stejná hodnota  $R_a$  [1]**

**Tabulka 5 - Typické metody –  $R_a$  [2]**

| Typická metoda výroby povrchu                | $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ] |
|----------------------------------------------|-------------------------|
| Dokončovací metody (broušení, lapování, atd) | 0,012 - 0,8             |
| Běžné obrábění (soustružení, frézování, atd) | 0,8 - 12,5              |
| Povrch polotovarů (výkovky, odlitky, atd)    | 25 - 400                |

**Tabulka 6 - Způsob výroby –  $R_a$  [2]**

| Způsob výroby        | $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ] |
|----------------------|-------------------------|
| Hoblování            | 3,2 - 1,6               |
| Frézování            | 3,2 - 0,8               |
| Vrtání, vyvrtávání   | 1,6 - 0,4               |
| Ruční pilování jemné | 1,6                     |
| Protahování jemné    | 0,8                     |
| Vystružování         | 0,8                     |
| Broušení na plocho   | 0,4                     |
| Broušení vnitřní     | 0,4 - 0,025             |
| Broušení do kulata   | 0,4 - 0,025             |
| Lapování             | 0,1 - 0,05              |

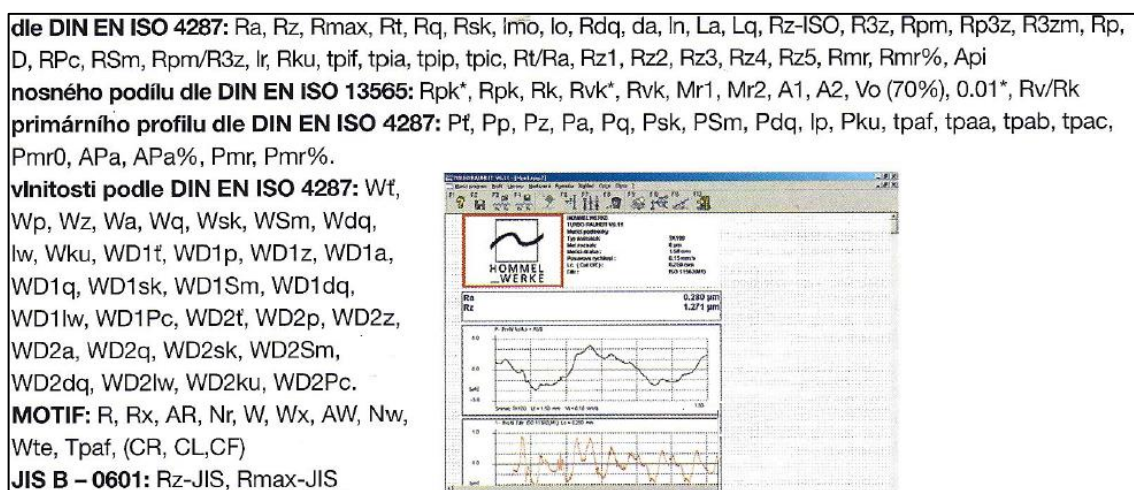
Z přehledu v tabulkách číslo 5 a 6 je patrné, že stejné drsnosti povrchu jsme schopni dosáhnout různými způsoby obrábění. Správná volba technologie závisí především na pohledu ekonomickém, na časové dotaci k výrobě, ale také na tvaru a rozměru obrobku. Výrazný nárůst nákladů na výrobu součásti s velmi hladkým povrchem nemusí vždy znamenat dobrý vliv ve směru funkčního přínosu.



### 2.7.1 Příklad parametrů drsnosti povrchu z katalogu drsnoměrů

V dnešní době se při propagaci digitálních drsnoměrů vyskytuje trend nabídky drsnoměrů s vyhodnocením co největšího počtu parametrů drsnosti povrchu. V této bakalářské práci uvádím jen základní parametry, které se v praxi používají, mají vypovídající hodnotu a dají se spolehlivě určit. Ostatní představované parametry bývají konfigurací a kombinací základních parametrů a popisují stejné vlastnosti povrchu. S určitou mírou korelace, závisející na druhu povrchu, lze najít vztahy mezi podobnými parametry. Současné normy ISO poukazují na více než 57 různých 2D parametrů. [19]

Pro ukázkou jsem si vybral laboratorní drsnoměr Hommel Tester T8000 z katalogu Přístroje pro přesná měření [20], který se používá při výstupní kontrole ve výrobních linkách. Výpis velkého počtu parametrů vyhodnocovaných přístrojem je patrný z obrázku 23.



Obrázek 23 - Příklad parametrů [20]

Dnešní měření a hodnocení struktury povrchu vede k tomu, že se výrobci měřící techniky velmi podílejí na způsobu měření a hodnocení struktury povrchu, na úpravě a zlepšování normalizace parametrů a na neustálém rozvíjení software pro vyhodnocení zkoumaného povrchu. Vychází se zde z předpokladu, že zákazník chce kromě požadované technické úrovně, přesnosti a spolehlivého vyhodnocení parametrů, také praktické a jednoduché zacházení s přístrojem. Cílem výrobců je, aby neodborný zásah obsluhy neovlivnil výsledek měření. To zajistí opakovatelnost měření a objektivitu výsledku měření a případné nižší nároky na kvalifikaci obsluhy. Přesto by neměla obsluha přehlížet základní pravidla, která by se měla při měření drsnosti dodržovat. Taková obecná pravidla představuje například příručka Exploring Surface Texture, kde se poukazuje na významné souvislosti při kontrole povrchu. [21]

## 2.8 Měření drsnosti

Pro měření drsnosti povrchu využíváme měřících přístrojů, pracujících na různých fyzikálních principech. Měření geometrických profilů nám vzhledem k nahodilým poruchám povrchu nepřináší úplnou představu o morfologii povrchu. Nejsme tak schopni přesně stanovit chování funkční součásti. S měřením drsnosti se setkáváme nejen ve strojírenství, ale také například ve stavebnictví, dopravě a jinde. [2]

Dnes stále ještě nejčastěji používáme k měření drsnosti povrchu profilovou metodu, při níž se měřící dotyk pohybuje po měřeném úseku. Měřením je získán profil povrchu, kolmý ke zkoumanému povrchu. Přístroj měřící drsnost povrchu kontaktní metodou se nazývá profilometr. Mezi nejdůležitější vstupní parametry při měření drsnosti povrchu patří poloměr špičky měřícího hrotu, který bývá součástí norem a pohybuje se mezi 2 až 5 mikrometry. Hrot má tvar kužele s vrcholovým úhlem 60° nebo 90°. Naměřená hodnota drsnosti povrchu bude výrazně ovlivněna geometrií hrotu doteku. Mezi další způsoby měření řadíme optické a elektronické metody měření. [3]

Kontrolu drsnosti povrchu rozdělujeme na dva základní způsoby:

- Kvalitativní hodnocení drsnosti povrchu
- Profilové a plošné metody kvantitativního měření drsnosti povrchu

### **2.8.1 Kvalitativní měření drsnosti povrchu**

Kvalitativní měření drsnosti povrchu je založeno na vyhodnocení pomocí lidských smyslů, především hmatem nebo zrakem za pomoci lupy nebo mikroskopu. Vzhledem k subjektivnímu vyhodnocení pozorovatele nemusí být měření a následné vyhodnocení přesné. Jsme limitováni nejen rozlišovacími smysly pozorovatele, ale i fyzikálními možnostmi, například mikroskopů. Mezi výhody tohoto způsobu měření patří bezesporu rychlost orientačního posouzení a vyhodnocení drsnosti povrchu a nízké náklady celého procesu. Nevýhodou pro přesnější rozlišení drsnosti je zajisté nutnost většího množství vzorků, se kterými může obsluha porovnávat měřený povrch, a nutnost dostatečného osvětlení. Kvalitativní měření se řadí mezi velmi často využívané metody pro běžnou výrobu v případě, kdy je zbytečné volit kontrolu mnohem přesnější. Volí se především, když je povrch mnohem lepší nebo horší anebo je zde přítomna vada, která by negativně ovlivnila funkci povrchu součásti. [2]

#### **2.8.1.1 Vzorkovnice drsnosti povrchu**

Vzorkovnice slouží k porovnání drsnosti plochy obrobené různou technologií (soustružení, frézování) . Pro správné vyhodnocení je nutné zabezpečit dostatečné osvětlení. Mezi další faktory ovlivňující porovnání patří druh a barva zkoumaného materiálu, velikost a tvar zkoumané plochy. [2]

Zvýšení hmatové citlivosti se docílí konstantním pohybem prstu po materiálu. Zkušený odborník je schopen vyhodnotit rozdíl  $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ . Za použití nehtu lze docílit lepší rozlišovací schopnosti. Okem je možno schopným pozorovatelem rozpoznat  $70 \mu\text{m}$  ze vzdálenosti 25 cm. [2]

Jako první vzorkovnice drsnosti byla roku 1918 ve Škodových závodech v Plzni zavedená tabule vzorků drsnosti povrchu. Drsnost byla značena dřívější, dnes již historickou, značkou pomocí trojúhelníků. [2]

Využití vzorkovnic pokleslo při rozšíření přenosných kvantitativních měřidel měřících rychle a spolehlivě s číselným výsledkem.

Mezi speciální vzorkovnice patří:

- Vzorkovnice na boky ozubených kol
- Vzorkovnice na otryskané plochy
- Vzorkovnice na leštěné plochy

- Vzorkovnice na plochy odlitků
- Vzorkovnice plochy broušené

#### 2.8.1.2 **Nepřímé kvantitativní měření drsnosti povrchu**

Nepřímé kvantitativní měření drsnosti povrchu využívá obdobného principu jako měření podle vzorkovnic, ale místo vyhodnocení pomocí lidských smyslů a úsudku se měřená plocha porovnává se vzorovou plochou za pomoci komparačních přístrojů. Tento komparační přístroj je založen na mnoha fyzikálních principech. Mezi využívané principy patří například: mechanický, elektrický, induktivní, pneumatický a fotoelektrický. Ačkoliv toto měření je založeno na způsobu porovnání se vzorovou plochou o známém parametru drsnosti, výsledný údaj drsnosti je analogovou hodnotou. [2]

V následující kapitole se zabývám dotykovými profiloměry, které ve značné míře omezily měření pomocí nepřímých kvantitativních měření drsnosti. Ta se již užívají jen v některých speciálních případech.

#### 2.8.2 **Profilové a plošné metody kvantitativního měření drsnosti povrchu**

Kvantitativní měření mikrogeometrie povrchu slouží k měření, hodnocení a případnému opětovnému měření upravené drsnosti povrchu využitím matematického popisu za pomoci parametrů. Jakost povrchu ovlivněná chemickými a fyzikálními jevy je směrodatná z hlediska funkčních ploch. Kvalita povrchu výrazně ovlivňuje životnost a spolehlivost součásti, a proto je vhodné se drsností povrchu zabývat a měřit ji pomocí kvantitativních měřidel. Vychází ze vztahu mezi mikrogeometrií povrchu a funkcí plochy součásti.

##### **Nezbytné pojmy:**

- Profilograf – měřicí zařízení drsnosti povrchu s výsledkem grafického záznamu profilu.
- Profilometr – přístroj, který automaticky vyhodnocuje některý z parametrů drsnosti povrchu.
- Profiloměr – zařízení v kombinaci profilografu a profilometru a také obecné vyjádření měřicího přístroje drsnosti povrchu za pomoci dotyku.

Bez ohledu na konstrukční provedení profilometru tvoří přístroj snímací médium (měřicí hrot, světelný paprsek) a posuvný mechanismus pro snímání na stanovené délce. Tento změřený profil je digitalizován a je základem pro filtraci a případné úpravy vyhodnocení. Základní funkcí kvalitativního přístroje je zpracování dat dle definovaného parametru drsnosti povrchu. Při měření struktury povrchu dotykovým a bezdotykovým způsobem můžeme získat lehce rozdílné výsledky. [22]

#### 2.8.3 **Pravidlo 16 %**

Toto pravidlo nám říká, že měřený povrch je přijatelný, pokud méně než 16 % všech naměřených hodnot nevyhovuje předepsané hodnotě horní meze na vyhodnocované délce. Platí zde pravidlo, že jedna hodnota z šesti měření nemusí vyhovět. Toto standardní pravidlo se nepředepisuje a platí vždy, pokud zde není stanovena horní mez parametru, pravidlo maxima, které se nesmí překročit. [1]

### 2.8.3.1 Gaussova křivka

Normální rozdělení dle Gaussovy křivky je základním vyjádřením spojitě náhodné veličiny. Normální rozdělení je označováno jako zákon chyb. Charakterizujícími veličinami normálního rozdělení je střední hodnota  $\mu$  a rozptyl  $\sigma^2$ . Střední hodnota  $\mu$  leží pod vrcholem křivky a celá křivka je od tohoto bodu symetrická. Hodnota parametru  $\sigma^2$  vypovídá o výskytu hodnot kolem střední hodnoty. Čím nižší je parametr, tím je výsledná křivka ostřejší a výsledek měření je méně rozptýlen od střední hodnoty. Zápis je dle rovnice 23, kde za  $X$  považujeme například výsledek měření. [23]

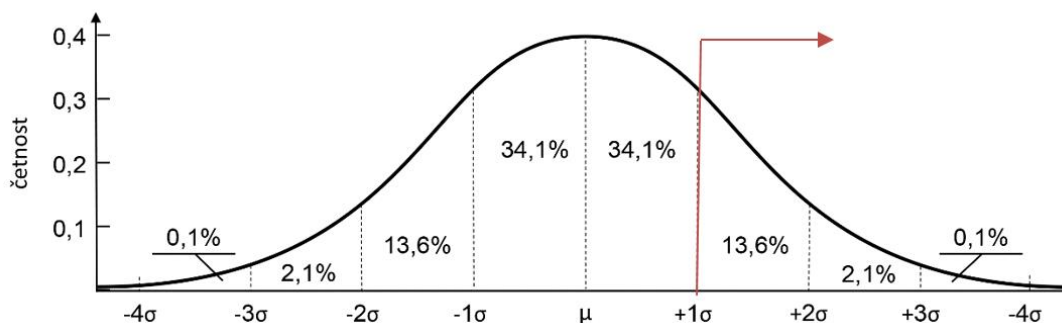
$$X = N(\mu, \sigma^2)$$

**Rovnice 23 – Gaussova křivka**

V praxi se používá pravidlo tří, dvou nebo jednoho sigma – směrodatné odchylky. Platí zde, že výsledek měření leží v intervalu:

- $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$  s pravděpodobností 68,27 %,
- $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$  s pravděpodobností 95,45 %,
- $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$  s pravděpodobností 99,73 %.

Pravidlo 16 % je v intervalu  $(\mu - 4\sigma, \mu + \sigma)$  s pravděpodobností 84 %. Nevyhovující měření je pouze v hodnotách z jedné strany funkce od směrodatné odchylky  $1\sigma$ , tj. 16 % vyznačených v grafu číslo 5 šipkou.



**Graf 5 - Gaussova křivka [24]**

Pokud předepsaná drsnost neobsahuje index max, bude povrch přijat a další postup zkoušky zastaven dle zjednodušeného postupu kontroly tehdy, když [24]:

- Při prvním měření je výsledek měření nižší než 70 % hodnoty definované na výkresu.
- První tři měření nepřesáhnou hodnotu uvedenou na výkresu.
- Maximálně jedna z prvních šesti měření nebyla v požadované hodnotě drsnosti povrchu.
- Maximálně dvě v prvních dvanácti měření přesáhnou požadovanou hodnotu na výkresu.
- Měření bylo provedeno více než dvanáctkrát, například pětadvacetkrát, s maximálně čtyřmi hodnotami mimo rozsah.

#### 2.8.4 Podmínky, které ovlivňují výsledky měření [25]

- Základní délka  $l$
- Cut-off  $\lambda_c$
- Vyhodnocovaná délka  $l_n$
- Typ snímače (úhel, radius hrotu)
- Absolutní vs. relativní měření
- Typ filtrace (RC, M1, PC50)
- Nastavení filtru  $\lambda_s$  a  $\lambda_c$
- Hodnota zesílení snímače
- Rychlost posuvu
- Přítlačná síla
- Způsob filtrace chvění
- Směr měření

#### 2.8.5 Měření dotykovými profiloměry

Tento způsob měření je stále nejčastějším způsobem měření. Základní princip je založen na rovnoměrně se posouvajícím doteku po měřené ploše v místě kritické drsnosti. Pro vyhodnocení se zde využívá měřený profil získaný v normálové rovině ke zkoumanému povrchu. Dotek je ve tvaru kuželového hrotu s velmi malým zaoblením, posouvá se konstantní rychlostí a je snímačem analyzován na změnu polohy. Tyto změny polohy jsou převedeny na analogové změny elektrického napětí nebo indukčnosti. Dále jsou převedeny do digitální podoby s výslednou hodnotou parametru nebo jsou vyobrazeny ve formě profilogramu. Je nutno zdůraznit, že grafický výstup profilu není pouze zvětšením drsnosti povrchu. To je způsobeno tím, že výšky nerovností jsou malé vzhledem k jejich rozteči. Pro dobře viditelnou analýzu je kromě zvětšení použita nezávislá volba měřítek pro zkoumání celého profilu. Použití různého měřítka os má za důsledek zkreslení tvaru výstupků a prohlubní. Proto je zde možnost využití stejného zvětšení v obou osách. Převedený digitalizovaný profil povrchu, který nám nese informace o měřené „kontuře“ v jednom směru, je vhodně zpracován a vyhodnocován dle požadavků kontroly s ohledem na normalizované či nenormalizované parametry. Toto vyhodnocování se provádí integrovaně v profilometru nebo za pomoci software v počítači. Geometrické parametry jsou vyhodnocovány dle norem, a to ze základního profilu, profilu drsnosti a profilu vlnitosti. Přístroje existují stacionární i přenosné, laboratorní a dílenské. Toto rozdělení se často prolíná. Dílenské (provozní) přístroje často měří pouze některé parametry ( $R_a$ ,  $R_z$ ), a laboratorní vyhodnotí několik desítek parametrů s vysokou přesností. Současně je zde, kromě snahy vysoké přesnosti měření na co nejmenším úseku, častým požadavkem dlouhý rozsah měření a velikosti vertikálního zdvihu pro měření kontury povrchu (tvaru ploch dvourozměrným měřením stopy) a úchylek tvaru. Dílenské profilometry často zvládají hrubší zacházení obsluhy na rozdíl od laboratorních zařízení. [2]

Dotykový profiloměr s mechanicko-elektrickým převodem patří mezi nejrozšířenější a nejuniverzálnější přístroje pro měření drsnosti povrchu. Mezi důležité vlastnosti patří přesnost měření, vysoká citlivost, vyhodnocení různých normalizovaných parametrů drsnosti a ztvárnění grafického záznamu – profilogramu. Využití dotykové metody je vhodné například při měření vrtaných otvorů či jiných nepřístupných elementů, které se velmi špatně měří optickým snímačem. Zřejmou výhodou je větší tolerance na znečištění oproti optickým metodám, u nichž je třeba čistého povrchu. Ať v případě malých

nečistot, které se posunou, nebo třeba v případě ignorace vlivu olejové vrstvy. V neposlední řadě patří mezi klady jednoduchá obsluha přístroje. [26]

## **2.8.6 Postup měření drsnosti povrchu**

Pokud není na výkresu uveden požadovaný směr měření, volíme ten, který bude zaznamenávat největší hodnoty výšek parametrů. Volba místa měření, pokud není jinak stanovena, je zvolena v místě nejkritičtější (často nejhrubší) drsnosti povrchu nebo v předpokládaném funkčním využití (hodnocení provozní způsobilosti). Dále musíme stanovit, zda je drsnost povrchu periodická či nikoliv. [6]

### **2.8.6.1 Postup měření pro periodický profil drsnosti [6]**

- Při povrchu s neznámou drsností odhadneme parametr – střední vzdálenost nerovností profilu –  $R_{Sm}$ , za pomoci srovnání podle vzorků, grafickou analýzou či zrakem.
- Ze zvolené hodnoty parametru dle tabulky z norem [6] zvolíme doporučenou hodnotu mezní vlnové délky cut-off.
- Pro zajištění přesnějších výsledků přeměříme hodnotu parametru  $R_{Sm}$ .
- Pokud hodnota nevyhovuje, vhodně zvolíme hodnotu mezní vlnové délky.
- Při správně zvolené mezní vlnové délce dostaneme správný výsledek.

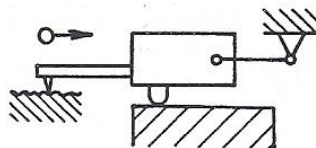
### **2.8.6.2 Postup měření pro neperiodický profil drsnosti [6]**

- Odhadneme neznámý parametr drsnosti  $R_a$ ,  $R_z$  nebo  $R_{Sm}$  libovolným způsobem.
- Následně se stanoví základní délka dle tabulky parametr drsnosti – základní délka.
- Měřícím přístrojem o nastavené hodnotě základní délky získáme hodnotu parametru.
- Výsledná hodnota parametru se porovná s rozsahem hodnot parametru ve zvolené základní délce.
- V případě hodnot mimo rozsah intervalu nastavme přístroj na menší / větší základní délku.
- Poté, pokud nebylo nastaveno v předchozím kroku, zvolíme základní délku kratší. Jestliže snížená základní délka také odpovídá intervalu hodnot drsnosti, potom je toto nastavení a hodnota správná.
- Pomocí splnění intervalu hodnot drsnosti v základní délce dostáváme reprezentativní výsledek.

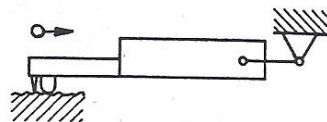
## **2.8.7 Konstrukční provedení mechanicko-elektrických snímačů dotykových profiloměrů**

Z konstrukčního hlediska budeme vycházet ze dvou základních principů.

Snímače absolutní se dotýkají pouze měřícím hrotem po měřeném povrchu a určují drsnost povrchu, vlnitost a úchyly tvaru od teoreticky přesné trajektorie měřícího hrotu snímače v posuvovém přístroji. Závěs snímače je pevný a vzhledem k zamezení chvění je i celá sestava velmi pevná. Z časového hlediska bývá velmi náročné vyrovnaní měřené plochy s dráhou měřícího hrotu. Další negativní vlastností je náchylnost na otřesy a nutnost opatrného zacházení. [1]

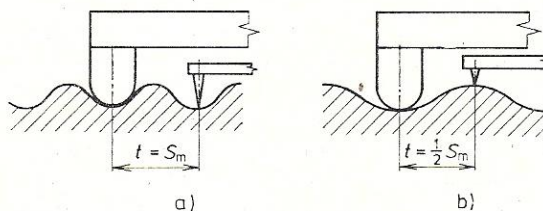


**Obrázek 24 – Snímač absolutní [1]**



**Obrázek 25 – Snímač relativní [1]**

Snímače relativní jsou vedeny jedním nebo dvěma opěrnými patkami. Princip je založen na relativních rozdílech vzdálenosti mezi měřícím hrotem a kontrolovaným bodem profilu plochy. Snímač automaticky odstraní odchylku povrchu, které nesouvisí s drsností povrchu, nýbrž s odchylkou tvarovou. Opěrná patka je zakončena kulovou plochou o velkém poloměru. Její tvar velmi ovlivní relativní základnu vzhledem k rozteči nerovností. Další vliv na měření má vzdálenost opěrné patky k měřicímu doteku a její umístění. Mohou zde nastat dva krajní vztahy viz obrázek 26. První by nastal, kdyby měřící hrot byl ve stejné fázi jako opěrka. V tu chvíli bychom měřili výšku profilu minimální. V druhém případě je možnost měřit výšky téměř dvojnásobné. Výhodou je, že nemusíme přesně vyrovnávat měřenou plochu s pohybem snímače. Tato metoda zvyšuje trvanlivost diamantového měřícího hrotu a projeví se zde mechanická filtrace vlivem opěrky k vlnitosti povrchu. Relativní snímače snášejí lépe otřesy. [20]



**Obrázek 26 – Vliv vzdálenosti opěrné patky [2]**

V případě moderních profiloměrů výrobci dodávají výměnné snímače pro relativní a absolutní měření. Zjištěný profil je profil získaný určitou metodou, který se blíží tvaru skutečného profilu. [1]

Měřící hrot, především jeho geometrie, rozhoduje, zda bude měřit všechny tvar nerovností povrchu až do dna prohlubní. Jako materiál hrotu se většinou používá diamant s vrcholovým úhlem  $90^\circ$  nebo  $60^\circ$  s poloměrem špičky v intervalu  $2\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$ . Volba vrcholového úhlu a poloměru zaoblení je limitována vlastnostmi diamantu a přitlačnou silou hrotu na měřený materiál. Při volbě velmi malého poloměru špičky vzniká riziko příliš vysokého tlaku, který překoná mez pružnosti zkoumaného materiálu. Dále pro menší poloměry špičky je problém s výrobou a následnou kontrolou poloměru. Velké poloměry špičky mají potíže v oblasti měření prohlubní parametru  $R_v$ . Hrot snímače musíme přitlačovat nezbytnou silou, aby byla špička při určité rychlosti snímání



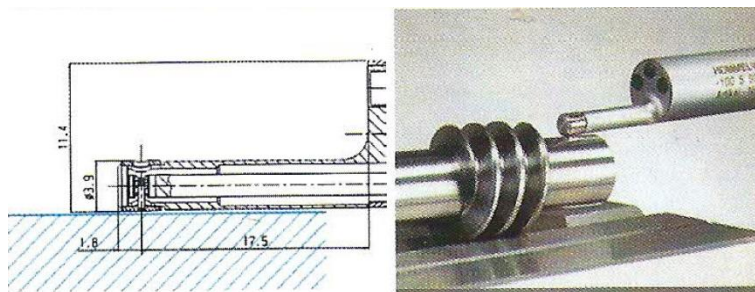
trvale v kontaktu s měřeným povrchem. Poloměry zaoblení jsou součástí norem ISO 3274.

Dnešní kontaktní měření drsnosti se kombinuje s funkcí měření kontury (tvaru plochy) za pomoci dlouhého rozsahu měření a vysoké vzdálenosti zdvihu. Je zde například možnost zdvihu 50 mm s přesností okolo jednoho mikrometru. Této flexibility se využívá jak v dílnách, tak v kontrolních a laboratorních případech. Díky měření kontur jsme schopni vyhodnotit zkosení, rádiusy a zápichy. Je zde možnost nastavení vzdálenosti měření a rychlost posuvu. Automatická kalibrace přístroje bývá samozřejmostí. Měření se provádí buď dvěma snímači pro samostatné měření drsnosti a kontury, nebo je zde společný snímač pro měření v jedné měřící sekvenci. Vyhodnocení probíhá za pomoci vhodného software. [26]

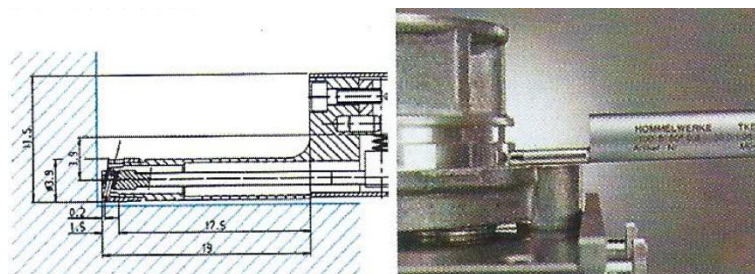
Měření na zakřivených plochách, oproti klasickému měření rovinných ploch, skrývá mnoho nevýhod. Jedná se například o měření povrchu koule, evolventy boku ozubeného kola. Pro řešení problému používáme metody, u nichž tvar povrchu moc neovlivní výsledek. Můžeme zvolit malou mezní vlnovou délku a použít opěrky v ose snímání. V tomto případě využíváme CNC měřících přístrojů, které jsou často za použití více jak tří os schopny měřit drsnost a konturu povrchu. Tyto stroje mnohonásobně urychlí proces měření a jsou dodávány s antikolizní funkcí. [15]

#### 2.8.7.1 Základní druhy snímačů

Podle potřeb měření zkoumaného povrchu nabízejí výrobci měřidel různé druhy snímačů. Různé tvary snímačů přináší vlastnosti potřebné pro měření dané problematiky. Následující obrázky jsou ukázkami snímačů drsnoměru Hommel-Tester T 1000 basic z katalogu: Přístroje pro přesná měření [20].

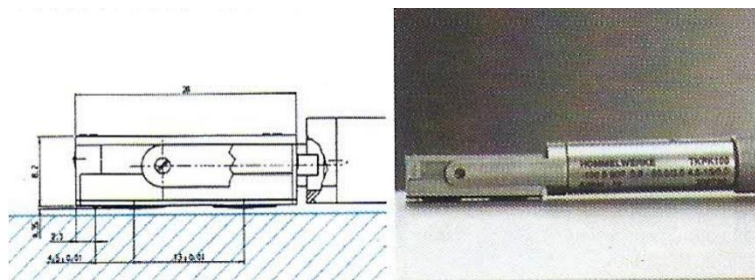


Obrázek 27 - Snímač na měření rovných ploch a hřidelí [20]

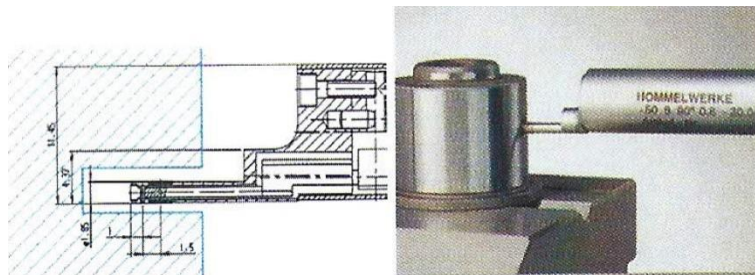


Obrázek 28 - Snímač na měření od čela [20]

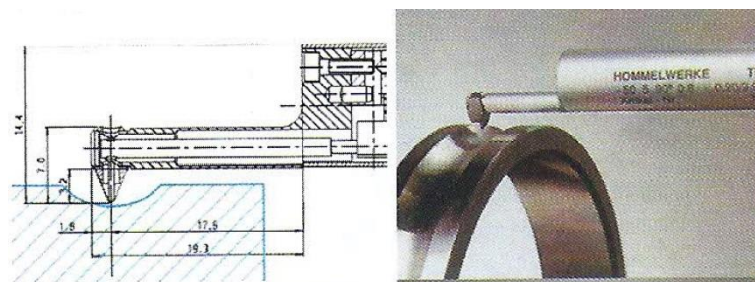




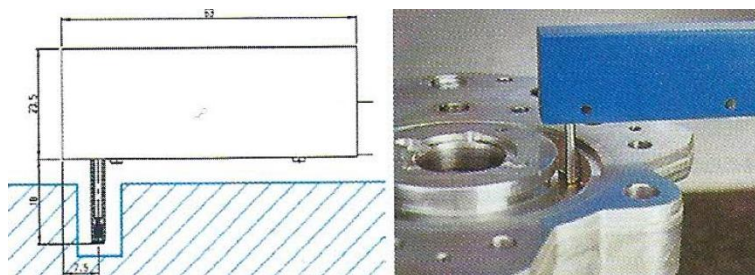
**Obrázek 29 - Snímač na měření plechů [20]**



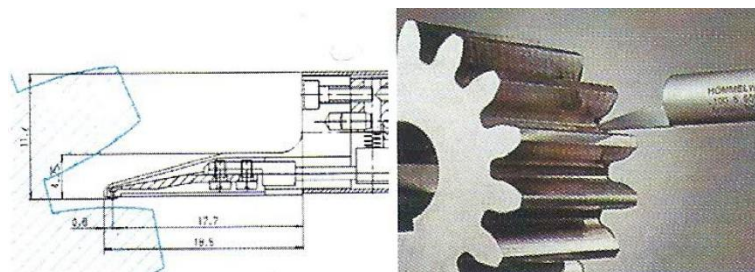
**Obrázek 30 - Snímač na měření otvorů od průměru 2 mm [20]**



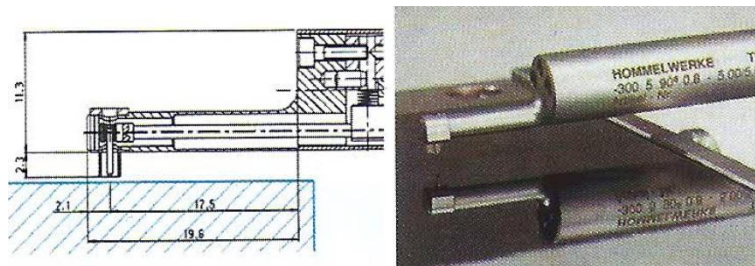
**Obrázek 31 - Snímač na měření konkávních a konvexních ploch [20]**



**Obrázek 32 - Snímač na měření drsnosti v zápichu [20]**



**Obrázek 33 - Snímač na měření drsnosti boku ozubených kol [20]**



**Obrázek 34 - Snímač s teflonovou kluznou patkou pro měření velmi citlivých ploch měřeného povrchu [20]**

### 2.8.8 Přístroje s okamžitou transformací profilu

Tyto přístroje patří do optických měřicích přístrojů. Přístroje kvantitativního měření využívají principu světelného řezu a interferenční metody. [1]

Tyto přístroje využívají různých metod:

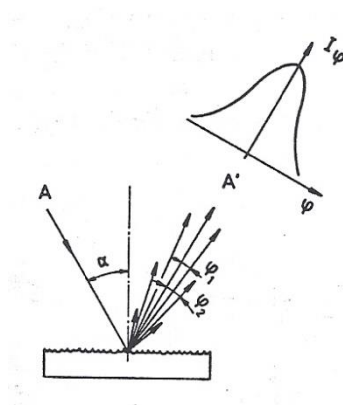
- Metody mechanického řezu. Tato laboratorní destruktivní metoda využívá znalostí z metalografie a pokovování.
- Metody světelného šikmého řezu.
- Interferenční metody. U této metody je dosaženo vysoké přesnosti v řádech nanometrů. Další výhodou optických metod je bezdotykové měření, a tím nepoškození měřeného povrchu. Především tento fakt má v praxi vliv na omezení klasických dotykových profilometrů a na větší využití bezkontaktní metody měření.

Podrobněji jsou metody představeny v literatuře Drsnost povrchu [2] od str. 203.

### 2.8.9 Optické měření drsnosti povrchu

Optické měření drsnosti má vedle nejpoužívanější dotykové metody také velké a stále častější zastoupení v použití pro své praktické přednosti. Již zmíněné dříve používané konvenční metody nezapadají mezi optické metody z důvodu jiného principu měření. Optický detektor analyzátoru povrchu vyhodnocuje měřenou charakteristiku z rozdílného záření odraženého od měřeného povrchu. Dopad paprsku je rozptýlen drsným povrchem do různých směrů, a detektor analyzátoru pak snímá a určuje intenzitu rozptylu světla. Parametr  $S_n$  je šířkou tohoto rozptylu. Tento parametr je určen drsností povrchu plošně na rozdíl od parametrů  $R_a$ ,  $R_z$ , které vyhodnotí drsnost v rovinných řezech. Z tohoto důvodu lze jen těžko stanovit vztah mezi  $S_n$  a  $R_a$ . Optické měření drsnosti povrchu má vysoké zastoupení použití ve výrobním procesu jako je broušení, kde je potřeba vysoká přesnost měření při vysoké rychlosti změření. Na základě této bezkontaktní metody lze odhalit opotřebení nástroje, případně nutné změnění řezných parametrů stroje. Požadovaného povrchu docílíme odstraněním chyb při výrobě, optimalizací trvanlivosti nástroje a následnou kontrolou drsnosti povrchu za pomoci optického měření. Princip měření s rozptylem světla využijeme také při stanovení vlnitosti, úchylek tvaru a v kontrolních procesech, kde je potřeba vysoká rychlost vyhodnocení povrchu. Nevýhodou optické metody je dosažení špatných výsledků měření na hranách povrchu a při rychlé změně tvaru povrchu. Ztráta dat může nastat i v případě velmi vysoké či nízké odrazivosti měřeného povrchu. Tuto záležitost řešíme kontaktním měřením povrchu. Chvění nemá takový vliv jako při dotykovém způsobu, navíc jsme schopni proces měření vyhodnotit znatelně rychleji. [27]

Na obrázku 35 je vyobrazen princip měření rozptylem světla.



**Obrázek 35 – Rozptyl světla [1]**

Rozdíl mezi kontaktním a bezkontaktním měřením spočívá ve velikosti snímače a následně v jeho rozlišovacích schopnostech vzhledem k rozdílné šířce pásma dat. Induktivní měření používá mechanické diamantové hroty s poloměry v rozsahu 2–12  $\mu\text{m}$ . Optické snímače mají průměr ohniska již od 1,1  $\mu\text{m}$  při zaostřování bodu na zkoumaném povrchu. Výsledkem je jemnější detail povrchu na rozdíl od kontaktní metody. U kontaktních měřicích systémů je potřeba úprava softwarem vzhledem k tomu, že měřicí kontaktní hrot má vlastnost rozšiřovat výstupky a zužovat šířku prohlubní. Tato korekce u optických měřidel není zapotřebí. Daná záležitost ovlivňuje i data pro určení šikmosti profilu. Významným využitím optických metod měření je zkoumání drsnosti povrchu měkkých součástí (materiálů) jako jsou například kontaktní čočky a součástky paměťových zařízení. Dále jej využijeme při měření drsnosti keramiky a brusných kotoučů, kde by se vzhledem k tvrdosti materiálu mohl dotyk přístroje poškodit. Při změření struktury povrchu kontaktní a bezkontaktní metodou můžeme dostat různé výsledky. Vzhledem k parametrům definovaným standardem ISO je v praxi stále hojně využívána dotyková metoda, přestože bezkontaktní metoda často dává lépe vypovídající přehled o struktuře povrchu. [20]

#### **2.8.10 Použití otisků pro měření drsnosti povrchu**

Dotykové profiloměry mají nevyhovující vlastnosti u součástí například velkých rozměrů, velké hmotnosti či součástí s nepřístupnými plochami, u kterých je nutnost stanovení drsnosti povrchu. V této situaci lze využít nepřímého způsobu měření drsnosti povrchu negativním otiskem nerovností. [2]

Otiskové hmoty mají tyto vlastnosti:

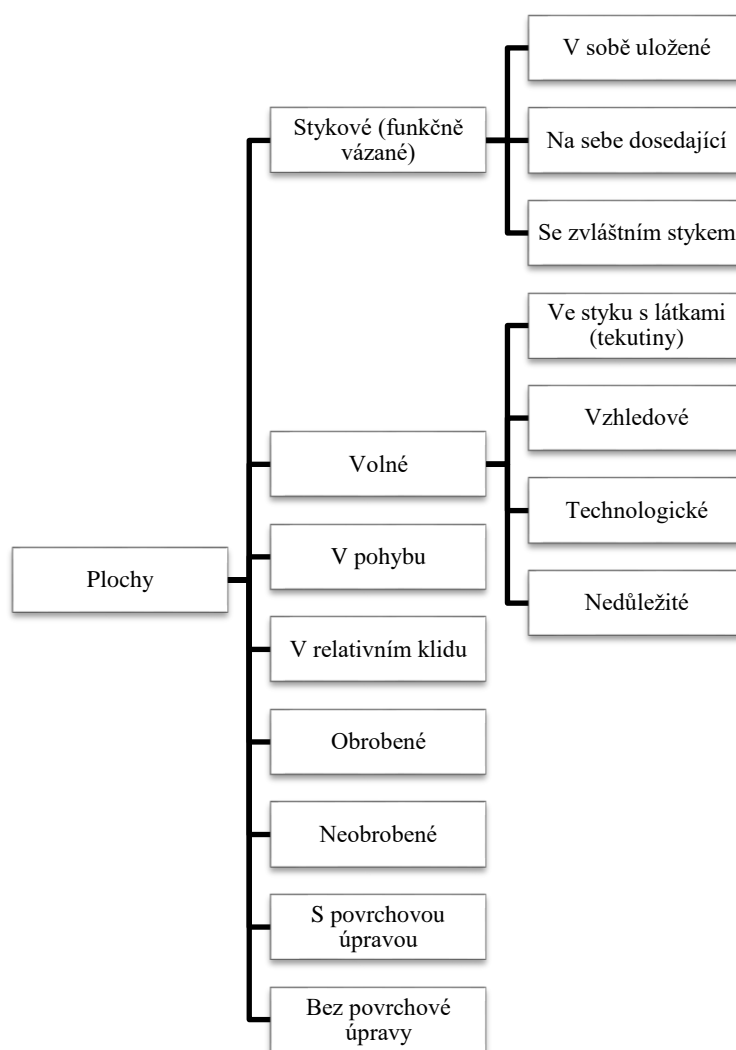
- Věrnost otisku do setin  $\mu\text{m}$ .
- Dostatečná tvrdost pro následné měření dotykovým způsobem.
- Co nejjednodušší postup vytvoření otisku.
- Snadné oddělení otisku od měřeného povrchu.

Tyto vlastnosti splňuje například methylmetakrylátová pryskyřice. Postup získání otisku je následující: Na očištěný odmaštěný povrch se umístí forma, například ohrádka z plechu. Do této formy se nalije sirupová hmota Dentacrylu řídké konzistence. Během vytvrnutí Dentacrylu vzniká teplo. Po deseti minutách je replika vytvrzena a lze ji

oddělit od zkoumaného povrchu. Výsledný otisk je dostatečně tvrdý a věrný měřenému povrchu. [2]

## 2.9 Vztah drsnosti povrchu a funkce plochy

Správná volba drsnosti povrchu značně ovlivňuje funkční vlastnosti plochy. Rozdělení ploch je zřejmé ze schématu vyobrazeného myšlenkovou mapou 3. Rozdělení je podle toho, zda dochází ke styku dvou těles v klidu nebo za pohybu, zda dochází ke styku tekutiny s tělesem (těsnost ventilů), případně zda má plocha tělesa plnit jinou funkci například vzhledovou nebo technologickou. Funkční plochy lze rozdělit z hlediska uložení do dvou skupin. První je uložení hybné, kde je nejvýraznější fyzikální vlastností vzájemná rychlost pohybu, vzájemné zatížení a způsob mazání. Tyto vlastnosti mají velký vliv na opotřebení, životnost, změny vůlí a případné zadření. U nehybných součástí máme často hlavní cíl přenášení sil a momentů. Při této záležitosti musíme vhodně zvolit přesahy a z nich vyplývající tlaky pro přenos sil požadované velikosti. Drsnost zde hraje důležitou roli z důvodu plastické deformace nerovností při nalisování, kde dále bereme v potaz zvolený přesah a vlastnosti materiálů soustavy.



Myšlenková mapa 3 – Funkční plocha [1]

Ke styku dvou pevných těles dochází v malých plochách určité oblasti. Velmi důležité je, zda ke styku těles dochází v klidu nebo za relativního pohybu. Mez únavy při cyklickém

namáhání závisí také na úpravě drsnosti povrchu. Při nesprávně úpravě povrchu a vznikem poruch při výrobě se objeví místa s koncentrací napětí. Ta způsobují snižování trvanlivosti součásti a následné trhliny, ostré hrany a nerovnosti povrchu mohou způsobit součást nefunkční. Ta musí být poté vyměněna. [28]

Drsnost při těsnosti ventilů může velmi komplikovat bezpečnostní rizika v případě hořlavých plynů a vstřikovacích palivových trysek. Je zde nutnost zabezpečit dostatečnou těsnost součásti během celé doby její funkce za provozních tlaků vyšších než 1 500 barů. Měření drsnosti povrchu na obvodu dosedacích ploch (kuželové dosedací plochy a přítlačné kuličky) analyzuje případné prosakování, a zvyšuje tak kvalitu výrobku. [29]

Krom mechanického přenosu energie dvou těles můžeme mít za cíl přenos energie elektrické a tepelné. Při nesprávném styku ploch v případě přenosu elektrického proudu je výsledkem vysoký elektrický odpor. Elektrický odpor se zvyšuje omezeným průřezem průtoku vzhledem k rozměru stykových ploch, případně vznikem oxidových vrstev na stykové ploše. Při přenosu tepla je situace obdobná, ačkoliv k přenosu tepla dochází i v případě mezery nerovností povrchu. Také vliv oxidových vrstev je menší. V případě nutnosti těsnění a nalisování spojených dvou ploch je důležitá jak velikost mezery mezi plochami, tak vytvořená textura (drsnost) povrchu. [1]

Za provozu strojní součásti dochází ke styku onoho povrchu s povrchem druhé součásti nebo s kapalinou či plynem. Při styku dvou těles za pohybu je tření a následné opotřebení ovlivněno rychlostí vzájemného pohybu, velikostí a tvarem výstupků, dobou provozu, způsobem mazání a chlazení a z toho vyplývající provozní teplotou. Výsledná styková plocha je jen malou částí celkové plochy vzhledem k dotyku pouze vrcholů nerovností. Zvýšení tlaku součástí se nerovnosti pružně a trvale deformují. Za relativního pohybu dvou ploch dochází k plastickému kluzu nerovností a k jejich odřezávání. Stanovením ideální hodnoty parametru mikrogeometrie lze odhadnout, jak se vyrobená součást bude chovat ve směru svých funkčních vlastností. Při správně zvolené drsnosti lze docílit zvýšení odolnosti proti opotřebení povrchu zvýšením únavové pevnosti. Neplatí zde teorie čím hladší povrch, tím kratší doba záběhu. Volba optimální drsnosti je ovlivněna nutnou přítomností maziva pro mazání styčných ploch. Při vyšším zatížení je vhodnější vyšší hodnota  $R_a$ , kdy se mazací médium udrží lépe než u velmi hladkých povrchů, kde se vytlačí. Velikost ploch styku je zde významnou vlastností, vrcholky se během provozu opotřebovávají. Tímto zaběhnutím a provozem se stykové plochy zvětšují. Nejlépe vypovídajícím parametrem je křivka materiálového poměru – nosná křivka, obsahující velmi vypovídající informace pro kluzné plochy, záležitosti tření a opotřebení. Je výhodné, aby stopy nerovností z výroby byly ekvidistantní se směrem dráhy pohybu. [4]

Mezi další významné funkce drsnosti povrchu patří schopnost udržení ochranného materiálu (nátěru) z důvodu funkčního, ochranného nebo vzhledového. Nanesení se provádí chemicky nebo fyzikálně. Výsledný objem naneseného materiálu je ovlivněn drsností povrchu, stejně tak jeho kvalita, tuhost nátěru a konečný vzhled. Zvolením ideální (hrubší) drsnosti lze docílit lepší hospodárnosti procesu povlakování a výsledného pozitivního ekonomického výsledku. V případě některých zvolených technologií povrchových úprav, například u metalizace, je nutnost dodržení přesně stanovené drsnosti, jinak dochází k nižší přilnavosti nanášeného materiálu. Pokud není potřeba ochranného nátěru, můžeme se také bavit o funkci reflexní – optické. V případě



funkce estetické –vzhledové se snažíme o hladký povrch s pravidelnou stopou nástroje. [3]

Výsledná správná volba drsnosti povrchu, volba parametru a jeho číselné hodnoty jsou významné vzhledem k funkci součásti, životnosti a nákladům na výrobu při zvolené technologii výroby. Drsnost povrchu nesmí být vyšší, než je konstruktérem předepsaná, a stejně tak nesmí být příliš malá vzhledem k náročnosti na výrobu a výsledné ceně výrobku. Příliš jemná drsnost by mohla být zdrojem problémů na funkci plochy při lisování, pájení, lepení nebo by způsobila horší přilnavost ochranného povlaku.

## 2.10 Vztah mezi drsností povrchu a předepsanou tolerancí

Požadovanou drsnost lze do určité míry zvolit podle rozměrové tolerance. Vychází se zde ze základního předpokladu, že drsnost povrchu nepřesáhne určitou část rozměrové tolerance. Vztah mezi drsností a tolerancí je vidět v rovnici 24. [1]

$$R_z = K T_D$$

**Rovnice 24 – Vztah drsnosti a tolerance**

$R_z$  - maximální výška profilu

$T_D$  - rozměrová tolerance

$K$  - součinitel

Součinitel  $K$  se volí v závislosti na rozsahu rozměrů dané tolerance, také závisí na typu uložení. Vzhledem k potřebě menšího opotřebení v případě kluzného pohybu v uložení s vůlí jsou hodnoty drsnosti nižší.

**Tabulka 7 – Součinitel  $K$  [1]**

| Rozsah jmenovitých rozměrů |    |             |
|----------------------------|----|-------------|
| D [mm]                     |    | K           |
| od                         | do |             |
|                            | 18 | 0,20 - 0,25 |
| 18                         | 50 | 0,15 - 0,20 |
| 50                         |    | 0,10 - 0,15 |

**Tabulka 8 – Součinitel  $K$  vzhledem k uložení [1]**

| Uložení    | K           |
|------------|-------------|
| s vůlí     | 0,05 - 0,07 |
| přechodné  | 0,08 - 0,1  |
| s přesahem | 0,1 - 0,12  |

Jelikož nejčastěji používaným parametrem drsnosti bývá střední aritmetická úchylka profilu  $R_a$ , je na základě velkého počtu měření získán vztah:

$$R_z = k R_a^B$$

**Rovnice 25 – Převod  $R_z$  na  $R_a$**

$R_a$  - střední aritmetická úchylka profilu

$k, B$  - konstanty závislé na způsobu obrábění

## 2.11 Automatizace procesu

Jasný trend automatizace procesů výroby ovlivňuje i automatizaci kontroly struktury povrchu. Dnes je častým řešením srovnávání měřeného povrchu se vzorovým povrchem a následné vyhodnocení pro technologické úpravy, které by měly zajistit požadovaný povrch výrobku. Ideálním řešením při plně automatizované výrobě je zjištění výsledné odchylky povrchu od definovaného etalonu a následné přizpůsobení procesu změnou korekcí obrábění za účelem požadované jakosti struktury povrchu. [21]

### 2.11.1 Průmysl 4.0

Pojem průmysl 4.0 označuje trend poslední doby v podobě digitalizace a automatizace výrobních linek a její vliv na zaměstnanost a trh práce. Lze jej také nazvat jako práce 4.0 nebo čtvrtá průmyslová revoluce. Pojem inteligentních továren se poprvé objevil v roce 2011. Cílem je omezit množství výrobních pásových linek, kde opakující se montáže a ostatní jednoduché úkony provádí lidé s nízkou kvalifikací. Cloudová uložení a datová centra budou mít díky očipování každého článku sestavy informace o množství zásob na chytrých skladech, množství hotových produktů, stavu materiálu, polotovaru, obráběcích strojích a náhradních dílech. Výsledkem by měla být výrazná úspora finančních prostředků a času, zvýšení životní úrovně a vyloučení chyb lidského charakteru. Požadavky jsou zde kladeny na kompatibilitu mezi zařízeními a na velmi vysoké rychlosti sítě přenosu informací, které vedou k cílené decentralizaci výrobních linek. Negativní vliv se projeví v propouštění zaměstnanců s nízkou kvalifikací. Nastane zde ještě vyšší poptávka po pracovnících s vyšší kvalifikací na správu strojů a zabezpečení chodu celé výrobní linky. [30]

### 2.11.2 Prostorové hodnocení povrchu 3D

Prostorové charakteristiky povrchu jsou novými možnostmi, jak vyjádřit a prezentovat strukturu povrchu. Vzhledem k další dimenzi a znatelně většímu množství dat je zde možnost objektivnějšího ohodnocení povrchu, případné předpovědi funkčního povrchu a vývoje změn během provozu. Následné prostorové analýzy struktury měřeného povrchu poskytují grafické zobrazení profilu v různých pohledech formou topografické mapy nebo záznamu intenzity souřadnic. Tato forma měření poskytuje velké množství informací, které je zkušený pozorovatel schopen využít. [31]

Opět zde využíváme přesně definovaných parametrů, které určitým způsobem popisují povrch. Prostorové hodnocení se značí písmenem „S“. Většina parametrů se analogicky odvíjí od parametrů drsnosti povrchu v 2D. Příkladem je uveden parametr výšky nejhlubší prohlubně a nejvyššího výstupku  $S_z = S_p + S_v$ . Parametr  $S_a$  je zde spíše z hlediska převzetí drsnosti parametru  $R_a$ . Vzhledem k možnostem dnešní výpočetní techniky lze využít této technologie, která je velmi progresivní. Nicméně klasické 2D měření je stále v popředí, vzhledem k normalizovaným a přehledným parametrům drsnosti povrchu, a navíc díky faktu, že celá metrologie textury povrchu je na ní postavena. Parametr jako prostorová hustota výstupku je často z 2D měření odhadován. Výsledná hodnota bývá o 20 % vyšší než je zkušenost, ale pro představu ve funkční ploše stačí. Spojení konvenčního měření 2D a prostorového zhodnocení 3D bývá v kombinaci dotykové a bezdotykové metody. Snímání povrchu pro prostorové hodnocení probíhá většinou po rovnoběžných profilech využitím jedné z metod. Pro terminologii, definici parametrů metody měření se ISO standard teprve připravuje. [32]

4D progresivní analýza změn textury povrchu bere kromě zmíněné 3D analýzy v úvahu další proměnnou charakterizující funkci povrchu. Proměnná může být čas, tlak, teplota nebo jiná fyzikální veličina. Místo statického pohledu je přínosem této metody sledování změn textury povrchu, průběh ve funkčním procesu, vliv opotřebení, deformace, vznik trhlin, eroze a jiných změn struktury. [33]

## **2.12 Alternativní možnosti sondy Blum TC64-RG**

Integrovaní sondy na měření drsnosti povrchu do obráběcího stroje nemá zatím plnohodnotnou náhradu. V následujících odstavcích je představena možnost automatického měření v souřadnicových měřicích strojích a laboratorní pracoviště na měření drsnosti a obrysů Zeiss.

### **2.12.1 Sonda od firmy Renishaw**

Sonda pro kontrolu drsnosti povrchu byla v roce 2011 představena společností Renishaw jako novinka pro automatické měření. Sonda může být začleněna do standardních držáků pětiosých souřadnicových měřicích strojů firmy Renishaw. Sonda nabízí možnost měření drsnosti v rozsahu 6,3 až 0,05 Ra. Sonda je zakončena kuželovým diamantovým hrotem o vrcholovém poloměru 2 mikrometry působícím na měřený povrch silou 0,001 N. Výstupní parametry jsou  $R_a$  a  $R_{MS}$ . Uživatel může během souřadnicového měření rozměru vyvolat funkci pro změnu sondy a začít měřit drsnost při původním upnutí obrobku. Pro flexibilní měření jsou nabízeny dva držáky doteku – přímý a zalomený pro měření různě tvarovaných prvků. [34]

### **2.12.2 Zeiss – SURFCOM C5**

Tento měřicí stroj je určen pro automatické zabezpečení jakosti v sériové výrobě. Pětiosý měřicí stroj s rotační a naklápěcí osou změří i nesnadno umístěné plochy rychle a přesně. Posun je realizován pomocí patentovaného systému lineárního pohonu, zabezpečujícího rychlost posuvu bez vibrací. Základna je tvořena kamenným stolem velké plochy. Měřicí stroj se využívá především pro bloky motorů, měření hlav válců, ale i klikových hřídelí, kde je zapotřebí rotační osy a enormní produktivity měření. Měření probíhá s maximálním rozlišením desetiny mikrometru a může využít měřicí rychlosti až 20 mm/s. Měřený objekt může dosahovat rozměrů až 800x500x200 milimetrů, kde využijeme maximální přejezdové rychlosti 100 mm/s. [35]



## 3 Praktická část – experiment

### 3.1 Integrovaní měřících sond struktury povrchu firmy Blum do obráběcích strojů „*vysoká kvalita, maximální produktivita*“

Stále častěji využívaná automatizace procesu výroby vznesla požadavek na automatické měření drsnosti povrchu obrobku během výroby v obráběcím stroji. Dnes jsou běžnou záležitostí obrobkové sondy na měření rozměru a pozice součásti, sondy na seřízení nástroje, případná detekce jeho zalomení. Bez integrace drsnoměru ve stroji musíme ručně využít přenosného drsnoměru, anebo většinou mimo stroj provést měření na specializovaném pracovišti. Tato činnost přerušuje výrobní proces a vede k mnoha následným chybám. Sondou od firmy Blum dosáhneme výstupní a mezioperační kontroly v původním upnutí přímo na číslicově řízeném obráběcím stroji.

Integrací měření do stroje získáváme možnost rychle průběžně kontrolovat a případně detekovat nekvalitní povrch během jednoho upnutí obrobku ve stroji, a to v co nejkratším čase. Tímto způsobem je možno například u velkých obrobků odhalit chyby povrchu způsobené během výroby a dále proces automatizace upravit (výměna opotřebovaného nástroje, změna řezných podmínek) nebo v nákladném obrábění nepokračovat v případě vytvoření neopravitelného zmetku funkční plochy. Nutnou vlastností sondy vzhledem k agresivním podmínkám v obráběcích strojích je odolnost vůči chladicí emulzi.

Tento způsob měření lze využít například u výroby motorových komponentů jako je ojnice, oběžná kola či vyvrtávání válců. V případě funkčních ploch jej lze využít pro kluzná spojení s mazivem, kde povrch nesmí být dokonale hladký. Se stejnou podmínkou se setkáváme v případě následného pájení nebo lepení. Vzhledem k pohybu hrotu drsnoměru za pomoci vřetene obráběcího stroje je zde možnost měřit strukturu povrchu nejen na rovinných plochách. Sonda je kombinací analogového drsnoměru a převodu do digitální podoby s přenosem dat do přijímače pomocí rádiové technologie 2,4 GHz. Výhodou přijímače RC 66 je možnost připojení až šesti zařízení. Speciální technologií od firmy Blum na bázi čelního ozubení je dosaženo konstantní přitlačné měřící síly dotykem nastaveným do různých poloh. Vyhodnocené parametry v případě této technologie jsou  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$ ,  $R_z$  a  $R_{max}$ . Je zde možnost zobrazení hodnoty parametrů, uložení hodnot do proměnných parametrů stroje nebo grafické zobrazení struktury povrchu. Díky novému software RG 3.0 lze vyhodnotit krom drsnosti povrchu i vlnitost a odchylku tvaru. Program pro měření běží v ovládacím panelu stroje provozující operační systém Windows 7. Obsluha pak může pohodlně přepínat mezi obrazovkami stroje a drsnoměru, a přizpůsobit tak proces výroby. Integrovaní software do jednoho ovládacího panelu je v praxi častou výhodou. [36]

Mezi hlavní výhody měření drsnosti v obráběcích strojích patří:

- Možnost automatizace procesu bez zásahu operátora.
- Dodržení drsnosti povrchu průběžnou kontrolou procesu.

- Změření drsnosti povrchu v původním upnutí obráběcího procesu.
- Podpora vysoké požadované kvality v co možná nejkratším čase výroby.
- Upozornění nebo ukončení procesu při nedodržení tolerance drsnosti povrchu.
- Odhalení zmetkovitosti na začátku výroby.
- Přizpůsobení řezných podmínek dle drsnosti povrchu.
- Změna či výměna opotřebovaného nástroje.
- Možnost využití nástroje do životnosti, která dodrží požadovanou drsnost povrchu.
- Zaznamenání výstupních hodnot do proměnných stroje a následná možnost vhodného využití pro další zpracování.
- Zobrazení výsledku měření pomocí grafického rozhraní.
- Možnost využití i jako obrobková sonda pro rychlé určení aktuální polohy obrobku.

### 3.1.1 Představení firmy Blum-Novotest

Německá firma Blum-Novotest je již pětadvacet let předním výrobcem inovativní a vysoce kvalitní měřicí techniky. Nabízí měřicí a testovací řešení ve strojním, automobilovém a leteckém průmyslu. Je známá řadou měřících komponentů jako jsou například laserové měřicí sondy nástrojů, dotykové obrobkové a nástrojové sondy. V neposlední řadě se společnost věnuje testovacím stanicím pro zkoušky opotřebení, životnosti a funkčnosti v automobilovém a leteckém průmyslu. Zájem firmy o automatizaci výroby vedl k odprezentování jejího prvního měřícího bezdrátového doteku drsnosti povrchu v roce 2013. Pro české strojaře byla v roce 2014 na mezinárodním strojařském veletrhu v Brně představena tato technologie doteku pro plně automatické měření drsnosti povrchu v obráběcích strojích. V nabídce jsou čtyři druhy měřících sond. V současné době je tato firma jediná, která nabízí drsnoměr do obráběcích strojů uchycením do vřetene stroje. Měřicí dotek nabízí možnost integrace do soustružnických, frézovacích i brousících CNC strojů. [14]

### 3.1.2 Nabídka sond firmy Blum

Následující tabulka číslo 9 nabízí přehled schopností minimální měřené drsnosti, čtyř nabízených sond. Z této tabulky od výrobce jsme vycházeli při provedení experimentu. Provedení experimentu proběhlo sondou TC64-RG.

Tabulka 9 - Blum sondy - Ra min

| Sonda / materiál na obrábění | TC63-RG TC64-RG                                    |          | TC63-RG Single                                                |          | TC76-RG                                                  |          |
|------------------------------|----------------------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------|----------|
|                              | TC63-RG: modulární<br><b>TC64-RG:</b><br>kompaktní |          | Aplikace pro rovné<br>povrchy, díry. Nižší<br>přítlačná síla. |          | Tuhost, bez<br>rádiového přijímače<br>kabelové provedení |          |
| Využití                      | Otvory, ozubená<br>kola                            |          | Ložisková sedla,<br>vrtání válců                              |          | Aplikace bez<br>možnosti rádiového<br>přijímače          |          |
| Drsnost [μm]                 | RZ (min)                                           | Ra (min) | RZ (min)                                                      | Ra (min) | RZ (min)                                                 | Ra (min) |
| Ocel - průměrné tvrdosti     | 3                                                  | 0,4      | 2                                                             | 0,2      | 3                                                        | 0,4      |
| Hliník - soustružený         | 8                                                  | 1,6      | 4                                                             | 0,8      | 8                                                        | 1,6      |

V tabulce číslo 10 jsou zpracovány technické parametry nabízených sond firmy Blum.

Tabulka 10 - Technické parametry sond

| Sonda                                     | TC63-RG TC 64-RG                                 | TC63-RG Single                                   |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Třída odolnosti                           | IP68                                             | IP68                                             |
| Maximální měřicí rychlost [m/min]         | 2                                                | 0,1                                              |
| Opakovatelnost                            | 0,4 $\mu\text{m}$ 2 $\sigma$                     | 0,4 $\mu\text{m}$ 2 $\sigma$                     |
| Měřitelná drsnost $R_y$ [ $\mu\text{m}$ ] | > 2                                              | > 1                                              |
| Parametry drsnosti                        | $R_a$ , $R_q$ , $R_t$ , $R_z$ , $R_{\text{max}}$ | $R_a$ , $R_q$ , $R_t$ , $R_z$ , $R_{\text{max}}$ |
| Komunikace [GHz]                          | RBC 2,4                                          | RBC 2,4                                          |
| Nástrojový držák                          | BTH 25 (HSK, SK, BT, VDI,)                       | BTH 25 (HSK, SK, BT, VDI,)                       |
| Rozlišení [mV/ $\mu\text{m}$ ]            | 12,3                                             | 34,8                                             |
| Citlivost převodu [ $\mu\text{m}$ /Digit] | 0,2                                              | 0,067                                            |
| Délka doteku [mm]                         | 40                                               | 40                                               |
| Přítlačná síla [N]                        | 0,35 - 2                                         | 0,08                                             |
| Rozsah výchylky měření [ $\mu\text{m}$ ]  | 550                                              | 180                                              |
| Maximální vychýlení                       | +15°/ 5mm                                        | 950 $\mu\text{m}$                                |

### 3.1.3 Hlavní schopnosti sondy TC64–RG

- Zařízení pro měření drsnosti.
- Možnost funkce jako dotyková obrobková sonda.
- Hlavní využití pro měření otvorů, boků obrobků, ozubených kol.

### 3.1.4 Vyhodnocované parametry

- Střední aritmetická úchylka profilu  $R_a$  – viz 2.6.3.8
- Střední kvadratická úchylka drsnosti  $R_q$  – viz 2.6.3.7
- Celková výška profilu  $R_t$  – viz 2.6.3.4
- Maximální výška profilu  $R_z$  – viz 2.6.3.3; poznámka: parametr měřen dle rovnice 12.
- Maximální výška profilu  $R_{\text{max}}$  – viz 2.6.3.3

U vyhodnocení z primárního profilu se používá mezní vlnová délka Cut-off  $\lambda_c$  pro rozlišení mezi profilem drsnosti a vlnitosti.

### 3.1.5 Software měření drsnosti RG 3.0

Software firmy Blum verze 3.0 nabízí nejen vyhodnocení hodnot parametrů drsnosti a jejich grafické zobrazení, ale také možnost definování tolerance drsnosti a následné upozornění obsluhy při jejím překročení. Způsob měření drsnosti povrchu se drží mezinárodní normy ČSN EN ISO 4287 a ASME B46.1. [14]

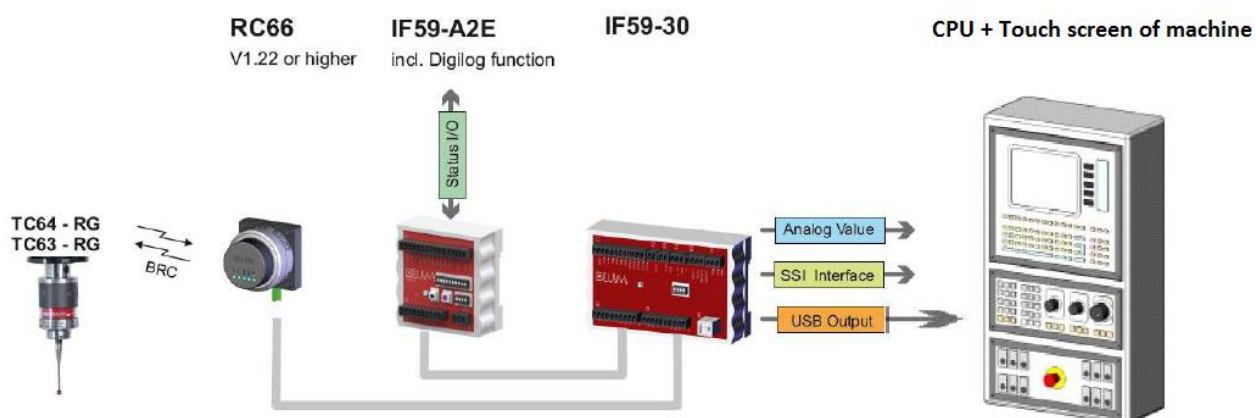
## 3.2 Instalace sondy na stroj pro potřeby experimentu

HW komponenty:

- Sonda TC64–RG
- Měřicí dotek RG L40/D3
- Držák sondy MAS BT40 (BT50)
- Přijímač rádiového signálu RC66
- Instalační Kit Okuma s IF59
- Interface IF59-30-A2
- USB kabel
- Spojovací kabel mezi IF59 a IF59-30

Instalace sondy Blum TC64–RG byla provedena na stroji Okuma MU-6300V, který je podrobněji popsán v kapitole 3.4.1 Představení obráběcího stroje Okuma MU-6300V s integrovanou sondou Blum.

Instalace měřicí sondy drsnosti povrchu probíhala obdobně jako instalace sondy obrobkové. V prvním kroku se přidělá přijímač rádiového signálu do obráběcího prostoru stroje. Kabel přijímače se zavede do elektrické skříně obráběcího stroje, kde se připojí k připravenému Interface IF59, který je zde pro zpracování signálů z přijímače a napájení přijímače. Interface je spojen kabelem s instalačním Kitem Okuma pro správnou komunikaci mezi sondou a obráběcím centrem. Zkoumané hodnoty jsou v podobě signálů z interface posílány přes USB kabel do počítače stroje, kde jsou následně vyhodnoceny. Obrázek 36 zobrazuje schéma zapojení sondy do stroje Okuma.



**Obrázek 36 - Schéma zapojení – Blum [37]**

Dále jsme vsadili měřicí dotek do sondy a mechanicky jej zkalibrovali stejně jako v případě měřicího doteku obrobkové sondy. Seřízení se skládá z uchycení doteku pomocí upínacích šroubků a následného seřízení čtyřmi šroubky seřizovacími. Kontrola souososti držáku, sondy a doteku probíhá klasickým páčkovým úchylkoměrem ukazujícím odchylku při otáčení tělem sondy. V případě mechanické kalibrace jsem využil možnosti pohodlného způsobu kalibrace na seřizovacím stroji značky Parlec, kde se dosáhlo přesnosti souososti na jeden mikrometr. Po vložení baterií do sondy se sonda umístí do kapsy zásobníku.

Následuje software instalace sondy Blum. Instalace probíhá v prostředí OS Windows na stroji Okuma. Instalace aplikace probíhá automaticky spuštěním .exe souboru. Nutný je pouze výběr jazyka instalace a výběr umístění pro nové adresáře. Instalační program obsahuje po dekomprimaci kontrolu nutných požadavků systému, konfiguraci systému a následnou instalaci programu ve formě umístění spustitelných souborů, knihoven, vytvoření konfiguračních souborů a jiných nezbytných souborů. Po úspěšné instalaci můžeme novou komponentu spustit a začít používat.

### 3.3 Obsluha sondy – základní příkazy

#### 3.3.1.1 Zapnutí / vypnutí sondy

M202 – TC64–RG v módě TC ON

M203 – TC64–RG v módě RG ON (modrá dioda)

M204 – TC64–RG OFF

### 3.3.1.2 *Ochranný posuv*

Tento cyklus slouží k bezpečnému dosáhnutí počáteční měřicí polohy. V případě kolize s obrobkem, který vyvodí vychýlení doteku během pohybu sondy, se sonda zastaví a vrátí do výchozí polohy.

09755 PA=\* PX=\* PY=\* PZ=\* PM=\*

Parametr A – Polohování sondy    PA=0 – Relativně  
PA=1 – Absolutně

Parametr M – Zapnutí / vypnutí sondy

M1 – sonda zůstane zapnutá  
M2 – Po skončení cyklu se sonda vypne  
M3 – Sekvence zapínání / vypínání sondy je přeskočena

### 3.3.1.3 *Linearizace*

Pro velmi přesná měření je nutno sondu nejprve kalibrovat způsobem linearizace. Linearizace je založena na zjištění poměru vychýlení doteku sondy vzhledem k převodu na napětí.

### 3.3.1.4 *Měření drsnosti*

09750 PA=1 PQ=3 PU=5 PV=25 PR=0,2

Parametr A – Výběr měřicího módu

PA=1 – Měření drsnosti

Parametr Q – Výběr předpřipraveného podprogramu měření dle odhadu předpokládané drsnosti, viz příklad z tabulky 11 pro program číslo 3.

Tabulka 11 - Q parametr - Blum

| Q | Měřicí vzdálenost [mm] | Test Plan | Měřicí rychlost [mm/min] | Odhadovaný rozsah Rz [μm] |
|---|------------------------|-----------|--------------------------|---------------------------|
| 3 | 5,6                    | 13        | 25                       | 0,5 - 10                  |

Parametr U – Výběr směru skenování povrchu v ose pro dodržení táhnutí dotyku po měřené ploše.

PU=1 X+; PU=2 X-; PU=3 Y+; PU=4 Y-; PU=5 Z+; PU=6 Z-

Parametr V – Tento parametr slouží ke zvolení rychlosti posuvu hrotu po zkoumaném povrchu, jiné než původní hodnoty z parametru Q.

Parametr R – Parametr sloužící k nastavení offsetu, který způsobí korekci vychýlení doteku.

### 3.3.2 Ukládání výsledků do proměnných

Po úspěšném vyhodnocení drsnosti povrchu se nám výsledky zapíší do proměnných stroje. Přiřazení parametru drsnosti k proměnné viz tabulka 12.

Tabulka 12 - Přiřazení drsnosti povrchu k proměnným stroje

| Parametr drsnosti | Proměnná |
|-------------------|----------|
| Ra                | VC182    |
| Rq                | VC183    |
| Rt                | VC184    |
| Rz                | VC185    |
| Rmax              | VC186    |

Výsledky v proměnných jsou vzhledem k přehlednosti bez desetinných čísel 1000x vyšší než naměřená drsnost v  $\mu\text{m}$ . Hodnoty proměnných ve stroji lze, dle schopností programátora, využít pro přizpůsobení následujících cyklů stroje.

## 3.4 Podmínky měření

Experiment byl proveden na dvou místech. Obrobení materiálu a provedení měření drsnosti integrovanou sondou Blum proběhlo ve firmě Misan s.r.o. za dozoru zaměstnance firmy, Ing. Josefa Koláře. Dále jsem provedl vyhodnocení parametrů drsnosti za pomoci dílenského drsnoměru značky Mitutoyo. Přeměření drsnosti pomocí laboratorního přístroje bylo provedeno za podpory ČVUT s odborným dohledem Ing. Petra Mikeše.

### 3.4.1 Představení obráběcího stroje Okuma MU-6300V s integrovanou sondou Blum

Tento stroj patří mezi pětiosá svislá obráběcí centra. Stroje řady MU jsou charakteristické vysokou dynamikou a přesností. Produktivita obrábění je zajištěna nejen výkonnými pohony umožňujícími vysoký úběr materiálu, ale také systémem výměny palety, výběrem nástroje ze zásobníku a software optimalizací. Přesnost je založena na tuhé, precizní montáži stroje i na sofistikovaných software řešeních.

Okuma hi-tech mechatronické prvky [38]:

- Machining Navi M-i – Způsob potlačení vibrací změnou otáček vřetene pro výsledek stabilních řezných podmínek. Otáčky vřetene se mění automaticky.
- Thermo friendly concept – Tento prvek zajišťuje teplotní korekci pro vyšší přesnost obrábění v případě neklimatizovaného prostředí.
- Collision Avoidance Systém – Tato opce poskytuje ochranu stroje před chybou operátora nebo programátora.

Řídící systém s označením OSP-P300M je systém vyvinutý firmou Okuma. Tento velmi intuitivní systém je ovládán přes dotykovou obrazovku. Velkou výhodou je, že odměřování jsou absolutní, tudíž není nutno najíždět při spuštění stroje do referenčního bodu.

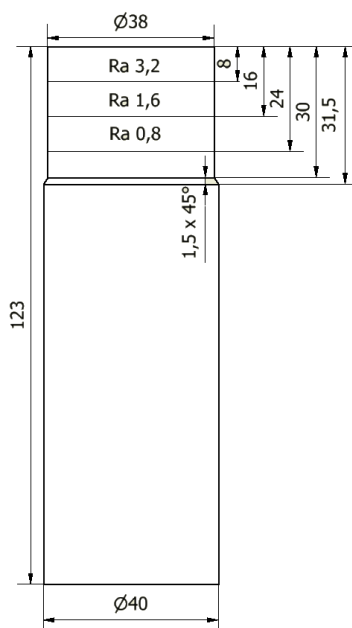
Technické parametry stroje jsou v příloze ke konci bakalářské práce.

### 3.4.2 Zkušební vzorek

Zkoumaný vzorek je obroben z kulatiny průměru 40 mm a délky 125 mm, materiálu zušlechťovací oceli 15 241. Zkušební vzorek byl soustružen na číslicově řízeném

soustruhu pro vytvoření pravidelného profilu drsnosti a vytvoření stejné kvality povrchu po celém obvodu kulatiny.

Po zarovnání čela na délku 123 mm jsme dokončovací operací vnějšího podélného soustružení obrobili kulatinu na průměr 38 mm se změnou posuvu po každých 8 mm. Obrábění probíhalo na dvě třísky, stejným nástrojem, vždy odebráním hloubky po půl milimetru. Cílem bylo vytvořit povrch o teoretické hrubosti 3,2 1,6 a 0,8 Ra. Mezi každým vzorkem drsnosti jsme nůž pozastavili pro vyrobení rozdělovací drážky. Břitovou destičku jsme zvolili typu DCMT 11T304 NLU značky Sumitomo. Břitová destička je typu D – diamond s vnějším úhlem 55° určená pro středně těžké obrábění. Tato břitová destička kosočtvercového tvaru s pozitivní geometrií břitu a úhlem hřbetu 7° má radius špičky 0,4 mm. Zbylé charakteristiky destičky lze vyhledat dle devíti normalizovaných ISO symbolů břitové destičky pro všeobecné soustružení.



**Obrázek 37 -Výkres zkušební vzorku**

Obráběcí podmínky jsme volili dle ukázky z tabulky 13. Při volbě břitové destičky s poloměrem špičky 0,4 mm jsme volili posuv 0,074 0,107 a 0,155 mm/otáčku pro drsnost povrchu  $R_a$  0,8 1,6 a 3,2. Obráběli jsme při řezné rychlosti 200 m/min. Během obrábění jsme chladili řeznou kapalinou.

**Tabulka 13 - Zvolený posuv při obrábění**

| $r_e$ [mm] | Drsnost $R_a$ [ $\mu m$ ] |       |       |              |              |              |       |       |       |
|------------|---------------------------|-------|-------|--------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|
|            | 0,1                       | 0,2   | 0,4   | 0,8          | 1,6          | 3,2          | 6,4   | 12,5  | 25    |
|            | Posuv [mm/ot]             |       |       |              |              |              |       |       |       |
| 0,1        | 0,012                     | 0,017 | 0,025 | 0,036        | 0,052        | 0,076        | 0,109 | 0,156 | 0,226 |
| 0,2        | 0,017                     | 0,025 | 0,036 | 0,052        | 0,075        | 0,108        | 0,156 | 0,223 | 0,323 |
| 0,4        | 0,024                     | 0,035 | 0,051 | <b>0,074</b> | <b>0,107</b> | <b>0,155</b> | 0,224 | 0,319 | 0,462 |
| 0,8        | 0,035                     | 0,051 | 0,073 | 0,106        | 0,153        | 0,221        | 0,32  | 0,457 | 0,661 |

Nepřesnost výsledného obrobeného povrchu je ovlivněna faktory, mezi nimiž bych zmínil především: materiál obrobku, řezné prostředí, řezné podmínky (řezná rychlost a posuv), parametry břitu a jeho opotřebení, celková stabilita soustavy stroj – nástroj –

obrobek. Vzhledem k cíli, porovnání vyhodnocených parametrů několika drsnoměrů, hodnotím obrobený povrch vzorku za přijatelný. Hlavní podmínka měření drsnoměry za stejných podmínek bude dodržena. Výsledný povrch by technolog ve většině aplikací prohlásil za výborný, splňující kvalitativní požadavky zadání s určitou rezervou.

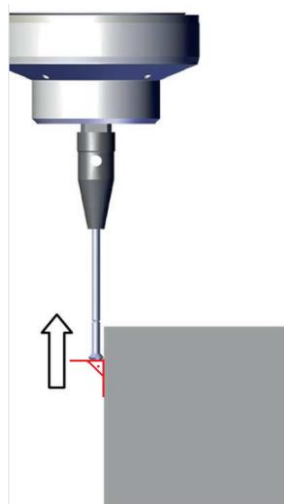
### 3.4.3 Vlivy na naměřené hodnoty

Níže uvedený výčet vlastností jsem stanovil jako hlavními faktory ovlivňující výsledky měření.

- Geometrie měřicího doteku – poloměr zaoblení hrany  $10\text{ }\mu\text{m}$ .
- Dodržení kolmého doteku hrotu sondy s měřeným povrchem.
- Konstantní přitlak doteku k povrchu součásti dodržením tažení dotyku rovnoběžně s povrchem.
- Nutnost vyšší přitlačné síly (rovnoměrný kontaktní tlak).
- Správný odhad intervalu zkoumané drsnosti povrchu.
- Správné seřízení poměru vychýlení doteku a generovaného napětí – linearizace.
- Vibrace stroje.
- Materiál zkoumaného povrchu.

### 3.4.4 Podmínky měření pro snímací dotek

- Směry pohybu musí vždy na dotek vyvozovat tah.
- Směr pohybu musí být kolmo k měřenému povrchu.

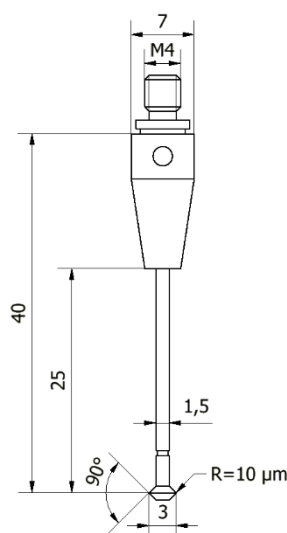


**Obrázek 38 – Snímací dotek Blum – kolmost [37]**

### 3.4.5 Geometrie snímacího doteku

Snímací dotek pro měření drsnosti povrchu je vyroben z karbidu. Dřík doteku je 25 mm dlouhý a má zakončení talířovitého tvaru o průměru 3 mm s úhlem  $90^\circ$  a poloměrem měřicí hrany  $10\text{ }\mu\text{m}$ . Celková délka doteku je 40 mm.





**Obrázek 39 - Snímací dotek – Blum**

**Tabulka 14 - Podmínky měření - shrnutí**

|                           | <b>Mitutoyo</b> | <b>Mahr</b> | <b>Blum</b> |
|---------------------------|-----------------|-------------|-------------|
| Teplota v místnosti [°C]  | 20              | 22          | 20          |
| Vlhkost [%]               | 65              | 40,5        | 60          |
| Tlak [hPa]                | 1028            | 1028,1      | 1021        |
| Cut - off [mm]            | 0,8             | 0,8         | 0,8         |
| $\lambda_s$ [µm]          | 2,50            | 2,50        | 2,5         |
| Měřená délka [mm]         | 4               | 4           | 4           |
| Délka měřeného úseku [mm] | 5,6             | 5,6         | 5,6         |
| Filtr                     | PC50            | PC50        | PC50        |
| Rychlost snímání [mm/s]   | 0,5             | 0,5         | 0,42        |
| Přítlačná síla [mN]       | 0,75            | -           | -           |
| Geometrie hrotu           | 178-243         | MFW         | TC63-RG     |
| Material doteku           | diamant         | diamant     | karbid      |
| R [µm]                    | 2               | 2           | 10          |
| Úhel [°]                  | 90              | 90          | 90          |

Tabulka 14 nám poskytuje ucelený přehled podmínek měření. V první části jsou uvedeny podmínky prostředí, které na měření drsnosti povrchu mají pouze zanedbatelný vliv. V části druhé jsou vypsány vstupní podmínky, které byly, pokud možno, voleny shodně. V poslední části jsou parametry geometrie doteku, které mají výrazný vliv na výsledné hodnoty měření parametrů.

Pro všechny tři vzorky drsnosti jsem volil shodnou základní délku 0,8 mm. Při teoretické drsnosti  $R_a$  3,2 bychom dle ISO normy měli volit základní délku rovnou 2,5 mm. Dle zkoušky měření a následných výsledků hodnot parametrů měření je tento vzorek drsnosti okolo hodnoty  $R_a$  2,0, což odpovídá hranici mezi cut - off 0,8 a 2,5 mm. Vzhledem ke zjednodušení měření a volbě shodných podmínek měření drsnosti jsem zvolil Cut – off 0,8 mm. V případě volby základní délky dle parametru  $R_z$  jsme se vždy vešli do intervalu 10 mikrometrů, tudíž byla použita správně základní délka 0,8 mm.

### 3.5 Průběh měření drsnosti povrchu sondou Blum TC64-RG

Po zapnutí stroje Okuma MU-6300V, který je vybaven sondou Blum TC64-RG pro měření drsnosti, jsme provedli několik kroků pro měření připraveného vzorku. V první části jsme

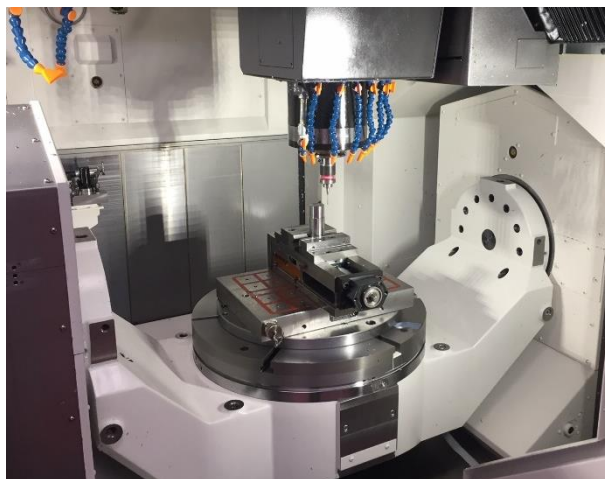
dle doporučení výrobce sondu zkalibrovali spuštěním programu na linearizaci. V dalším kroku jsme vzorek upnuli do pracovního prostoru, naměřili si jeho pozici, nahráli připravený program a spustili měření. Tyto kroky si detailněji popíšeme v následujících kapitolách.

### 3.5.1 Kalibrace sondy

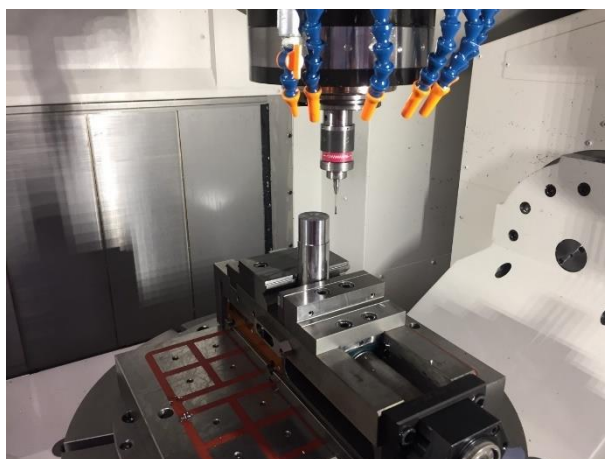
Před měřením zkušebního vzorku jsme provedli doporučené zkalibrování sondy. Průběh této linearizace je založen na vzájemném poměru dvou faktorů. První je přiřazení úhlu vychýlení doteku způsobeného opřením doteku o překážku posunutím vřetene stroje. Tento úhel se po několikanásobném ověření přiřadí k vygenerovanému napětí. Linearizace proběhla úspěšně, sonda je připravena na měření.

### 3.5.2 Upnutí vzorku do pracovního prostoru stroje

Zkoumaný vzorek jsme upnuli na pracovní stůl obráběcího centra. Osou A – kolébkou obráběcího stroje jsme najeli do vodorovné pozice. Zkoumaný vzorek pro měření byl svisle vložen na stůl a pevně upnut do připraveného svěráku. Pro lepší představu je následující obrázek 40 a 41.



**Obrázek 40 - Upnutí vzorku ve stroji**



**Obrázek 41 - Detailnější pohled upnutí**

### 3.5.3 Určení pozice měřeného vzorku analogovou sondou

Měření proběhlo analogovou obrobkovou sondou značky Garant typu: 35 9520 se stupnicí po setině milimetru. Měření proběhlo dotekem ze čtyř stran pro určení os X a Y.

Následným výpočtem jsme získali pozici osy měřeného vzorku v souřadnicovém systému. V posledním kroku jsme dotekem shora získali pozici čela zkoumané kulatiny v ose Z.

Původním záměrem bylo měření digitální obrobkovou sondou značky Blum, ale vzhledem ke zlomení doteku nebyl tento způsob měření k dispozici.



**Obrázek 42 - Změření pozice vzorku**

#### **3.5.4 Vytvoření a vložení měřicího programu**

Program byl externě vytvořen v základním programovacím jazyce CNC strojů, ISO-kódu a poté vložen do stroje. Program se skládá z několika základních částí. V přípravě pro měření je zvolení nástroje sondy a najetí nad měřený kus. V dalším kroku najedeme bezpečným posuvem k měřenému povrchu součásti. Provedeme měření drsnosti

a následuje odjetí bezpečným posuvem. Náhled programu je zobrazen níže včetně okomentované části v závorkách.

```

NSTR                                (Počátečné návěští)
DRS=3 (1,2,3)                      (Lokální proměnná určující volbu měřené drsnosti)
N1 G15H3                           (Výběr nulového bodu souřadnicového systému - obroбку)
N2 G0Z999.                         (Nájezd do limitu Z)
A0 C0                              (Osa A a C v základní pozici)
N3 G0X400.                         (Přijetí v ose X)

NDR                                (DRSNOST)
T98 M6                             (Volba nástroje - vyvolání sondy)
IF [DRS EQ 1] NMER                 (Podmínka pro zadání správné proměnné drsnosti)
IF [DRS EQ 2] NMER
IF [DRS EQ 3] NMER
GOTO NEND

NMER
N33 G0X26.Y0                       (Nájezd)
N34 G0G56HA Z100.                 (Načtení délkové korekce - doteku)

CALL 09755 PZ=-8.*DRS             (100mm bezpečného nájezdu)
CALL 09750 PA=1 PQ=3 PU=5 PV=25 PR=0.2 PX=-10 (Měření drsnosti; Program 3,)
(Posuv hrotu v Z+; Rychlost 25 m/s; Přídavek na vychýlení 0,2 mm; Nájezd k povrchu 10 mm)
CALL 09755 PZ=50.                 (Bezpečný odjezd)

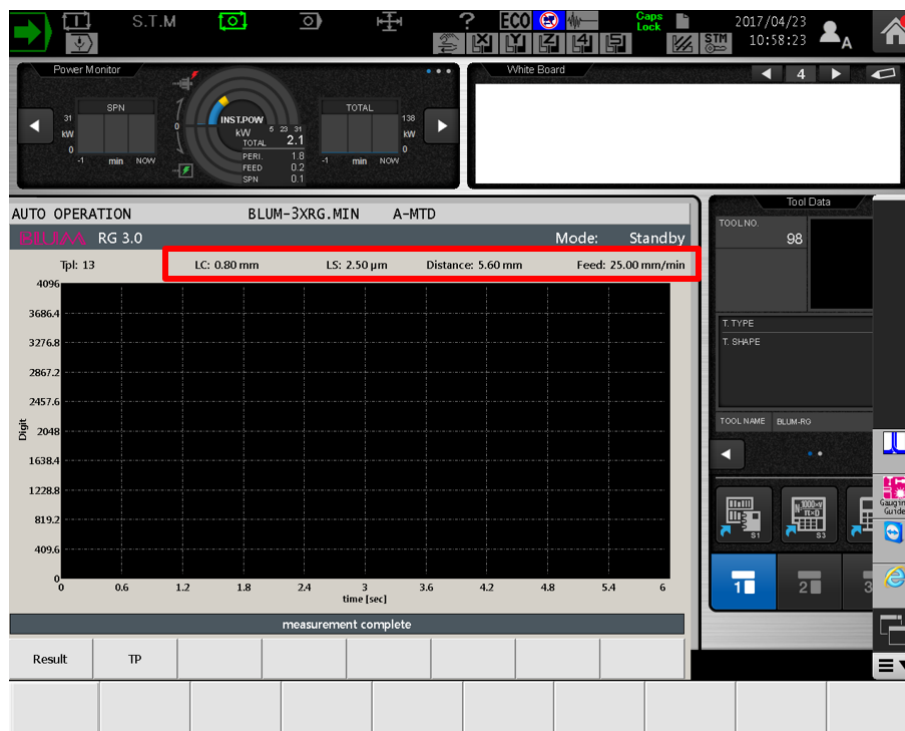
M01                                (Volitelný stop)
N41 G0Z999.                       (Odjezd do max Z)
N42 G0X400.                       (Odjezd vpravo)

NEND M2                            (Konec hlavního programu)

```

### 3.5.5 Volba vstupních podmínek

Pro měření drsnosti vzorku jsme zvolili dle normy základní délku 0,8 mm. Měřený úsek, skládající se z pěti základních délek a vzdálenosti pro rozjezd a dojezd doteku, je dlouhý 5,6 mm. Filtr profilu  $\lambda_s$  je nastaven na hodnotu 2,5  $\mu\text{m}$ . Na obrázku 43 je vidět snímek obrazovky před měřením drsnosti s viditelnými vstupními parametry měření.



**Obrázek 43 - Blum - Vstupní parametry**

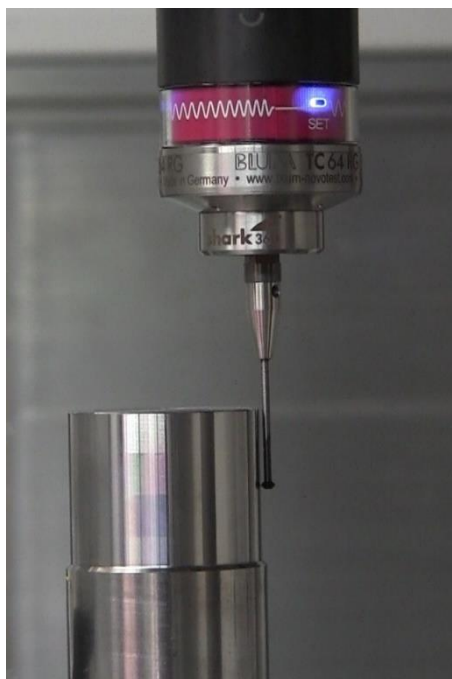
### 3.5.6 Měření drsnosti povrchu a vyhodnocení parametrů drsnosti

Samotné měření drsnosti je provedeno za 13 sekund. Spuštěním programu začne měření trvající přibližně 45 sekund, skládající se z několika úloh popsanych v odstavcích níže.

Program měření začíná přiblížením se ke vzorku rychloposuvem, následně se sonda přepne do režimu bezpečného nájezdu, kde při zavadění o překážku v dráze posuvu dojde k zastavení cyklu, a zabráni se tím destrukci doteku nebo celé sondy. O tomto stavu jsme informováni rozsvícením zelené diody. Dotek se přiblíží k měřenému povrchu a dotkne se ho za účelem zjištění pozice povrchu, stejně jako v případě obrobkové sondy. V následujícím kroku se dostáváme k měření drsnosti jako takovému. O tomto stavu jsme informováni diodou v barvě modré.



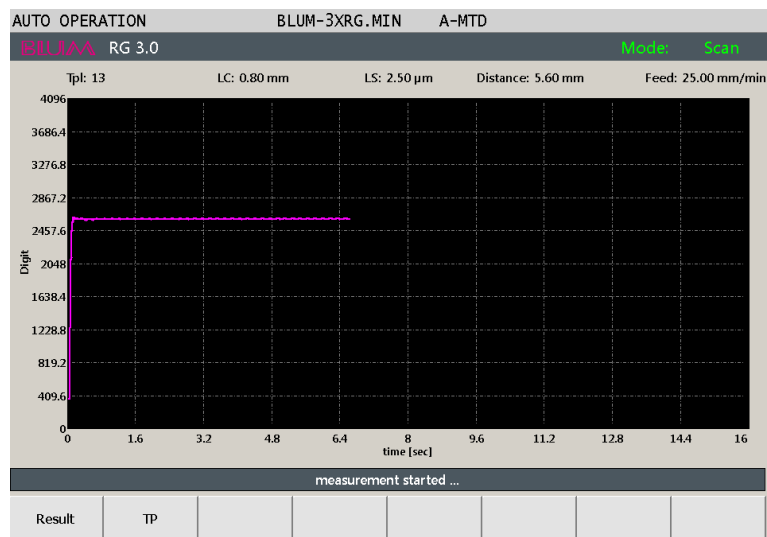
**Obrázek 44 - Blum - Režim obrobkové sondy**



**Obrázek 45 - Blum - Režim měření drsnosti**

Pokud vyhodnocení proběhne v rozsahu předpokládaných hodnot, sonda se bezpečným posuvem v barvě zelené diody vrátí do původní pozice. Měření v tu chvíli končí a sonda odjede rychloposuvem do žádané pozice.

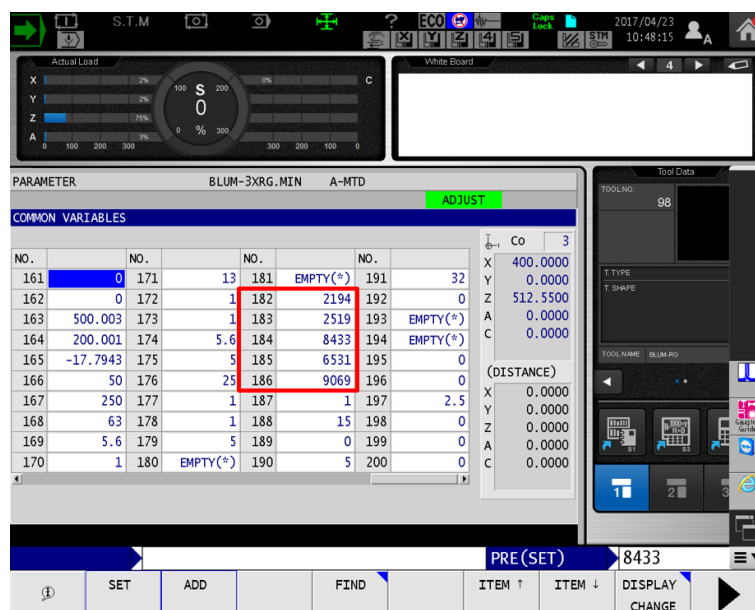
Na obrázku 46 níže je zobrazen snímek z průběhu měření drsnosti s teoretickou hodnotou  $R_a 0,8$ .



**Obrázek 46 - Blum - Průběh měření**

Hodnoty z měření se nám zapíše do proměnných stroje na pozici 182-186 v pořadí parametrů:  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ . Výsledek hodnot parametrů v mikrometrech je

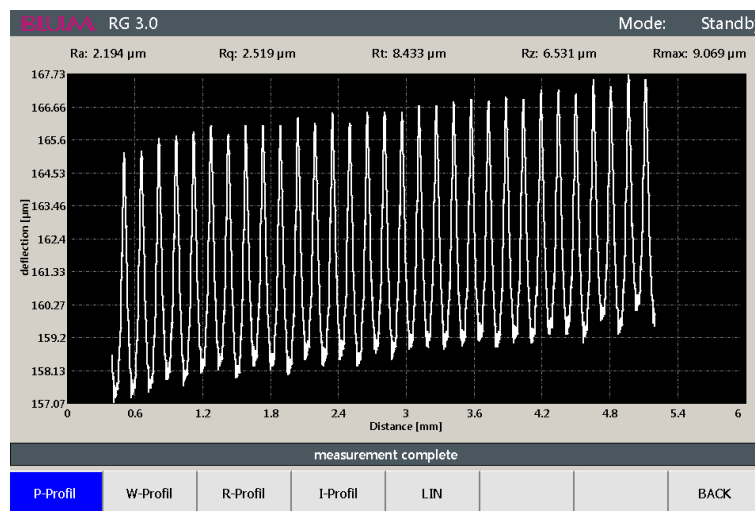
pro přehlednější zápis bez desetinné čárky, to znamená tisíckrát větší. Ukázku z prvního měření vidíte na obrázku 47 níže.



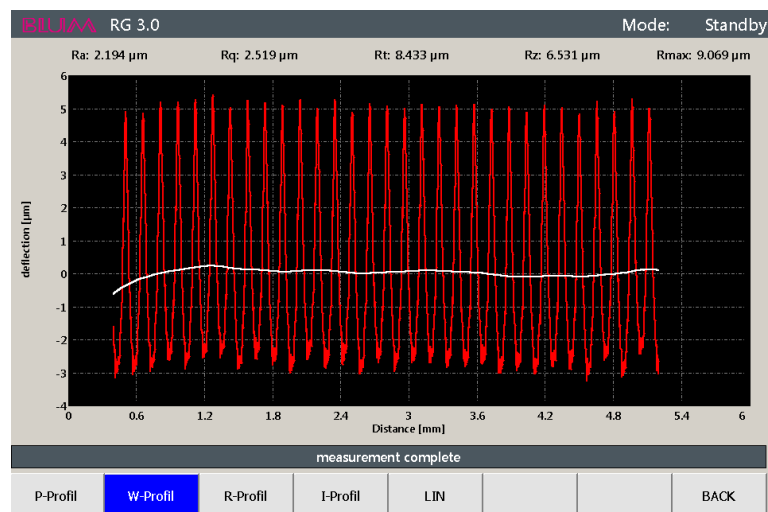
Obrázek 47 - Blum - Proměnný

### 3.5.7 Grafický výstup měření

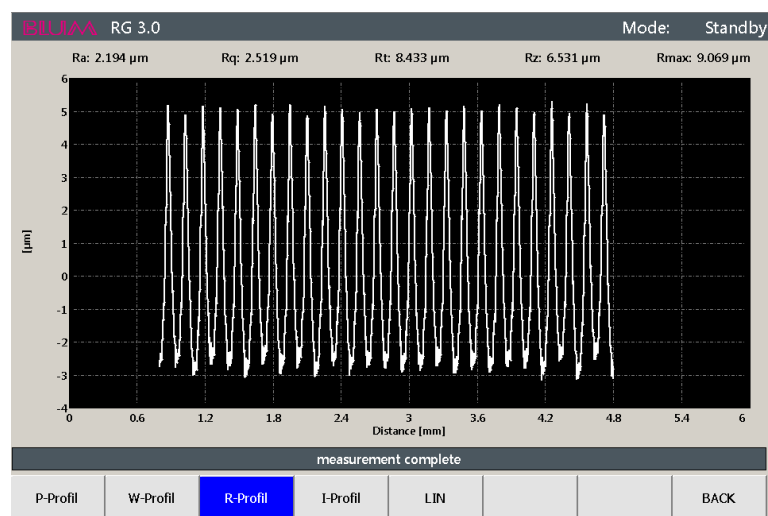
Po úspěšném měření dostaneme číselné hodnoty parametrů drsnosti a grafické vyobrazení základního profilu, vlnitosti, drsnosti a odchylky tvaru. Na následujících obrázcích jsou snímky z obrazovky těchto geometrických nerovností.



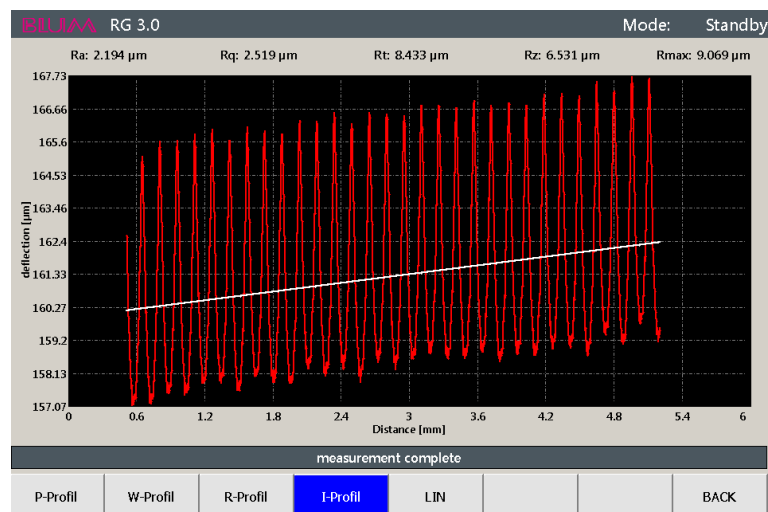
Obrázek 48 - Blum - Základní profil



Obrázek 49 - Blum - Vlnitost



Obrázek 50 - Blum - Drsnost povrchu



Obrázek 51 - Blum - Odchylka tvaru

### 3.5.8 Výsledky měření – Blum

Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu jsou zpracované v tabulce číslo 15. Měření drsnosti povrchu proběhlo vždy dvakrát v jednom místě a poté byl vzorek otočen



o 180° a změřen opět dvakrát. Hodnoty parametrů drsnosti jsou vždy porovnány s teoretickou drsností stanovenou obrobením vzorku za zvolených řezných podmínek.

Tabulka 15 - Výsledky měření Blum

| Teoretická drsnost<br>stanovená obrobením | Poloha | Opakování | Ra [μm] | Rq [μm] | Rt [μm] | Rz [μm] | Rmax [μm] |
|-------------------------------------------|--------|-----------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| 3,2                                       | 0°     | 1         | 2,194   | 2,519   | 8,433   | 6,531   | 9,069     |
|                                           |        | 2         | 2,149   | 2,467   | 8,257   | 7,958   | 9,110     |
|                                           | 180°   | 1         | 2,203   | 2,526   | 8,239   | 8,037   | 9,022     |
|                                           |        | 2         | 2,210   | 2,533   | 8,242   | 8,063   | 9,109     |
| Průměr                                    |        |           | 2,189   | 2,511   | 8,293   | 7,647   | 9,078     |
| Směrodatná odchylka                       |        |           | 0,024   | 0,026   | 0,081   | 0,646   | 0,036     |
| 1,6                                       | 0°     | 1         | 1,016   | 1,201   | 4,389   | 4,273   | 4,614     |
|                                           |        | 2         | 0,980   | 1,114   | 4,102   | 3,949   | 4,467     |
|                                           | 180°   | 1         | 1,024   | 1,201   | 4,242   | 3,294   | 4,571     |
|                                           |        | 2         | 1,011   | 1,187   | 4,180   | 4,058   | 4,528     |
| Průměr                                    |        |           | 1,008   | 1,176   | 4,228   | 3,894   | 4,545     |
| Směrodatná odchylka                       |        |           | 0,017   | 0,036   | 0,105   | 0,365   | 0,054     |
| 0,8                                       | 0°     | 1         | 0,503   | 0,584   | 2,342   | 1,704   | 2,918     |
|                                           |        | 2         | 0,511   | 0,592   | 2,294   | 1,736   | 2,887     |
|                                           | 180°   | 1         | 0,500   | 0,582   | 2,257   | 1,704   | 2,842     |
|                                           |        | 2         | 0,504   | 0,588   | 2,226   | 1,727   | 2,846     |
| Průměr                                    |        |           | 0,505   | 0,587   | 2,280   | 1,718   | 2,873     |
| Směrodatná odchylka                       |        |           | 0,004   | 0,004   | 0,043   | 0,014   | 0,031     |

Vzhledem k obrábění povrchu vzorku soustružením by měla obrobená plocha vykazovat stejnou hodnotu drsnosti povrchu po celém obvodu. Obrobený povrch ve tvaru šroubovice, vytvořený hlavním rotačním pohybem obrobku a vedlejším pohybem podélného posuvu nástroje, je především ovlivněn těmito faktory: posuv na otáčku, řezná rychlost a výběr geometrie břitové destičky se zaměřením na radius břitu a jeho opotřebení. Vhodnou kombinací těchto faktorů bychom měli dostat výsledný povrch stejné kvality po celém obvodě. Drobné změny nastanou vlivem výběru břitové destičky vzhledem k obrábění zvoleného materiálu a důsledkem plastické deformace při obrábění. Negativní faktory jsou také způsobeny cyklickým opotřebením břitové destičky, náhodným chvěním soustavy a zhoršením povrchu vlivem vytvářejících se třísek.

Vzhledem k perfektnímu stavu obráběcího stroje, výborné kvalitě nové obráběcí destičky, jsem se snažil co nejvíce zamezit různé drsnosti povrchu na obvodu vzorku. Z tohoto důvodu jsem se ze čtyř měření pro každý vzorek drsnosti rozhodl pro výpočet průměru a směrodatné odchylky  $\sigma$ .

Pro druhou odmocninu rozptylu – směrodatnou odchylku jsem použil tuto rovnici číslo 26.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Rovnice 26 - Směrodatná odchylka

$\sigma$ ... kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od jejich aritmetického průměru

$\bar{x}$ ... průměrná hodnota

### 3.6 Kontrola drsnosti povrchu vzorku dílenským drsnoměrem Mitutoyo SJ201P

Změřené hodnoty drsnosti měřeného povrchu vzorku získané sondou Blum byly porovnány s měřeními dvou typů standardních drsnoměrů.

Prvním porovnávacím přístrojem na měření drsnosti povrchu testované součásti je přenosný drsnoměr značky Mitutoyo s odnímatelnou měřicí sondou. Jeho nespornou výhodou je velmi přehledné a pohodlné ovládání. V základním režimu jsou zde tlačítka pro zapnutí/vypnutí drsnoměru, start měření a přepínání mezi vyhodnocenými parametry. Pro nastavení ostatních parametrů a vstupních hodnot využijeme rozšířených ovládacích tlačítek. Drsnoměr pracuje na principu relativního měření s měřícím hrotem a opěrnou patkou.



Obrázek 52 - Mitutoyo

#### 3.6.1 Zkontrolování vyhodnocování parametrů dle etalonu

Měřicí přístroj značky Mitutoyo jsme podrobili zkušebnímu měření s etalonem. Změřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu etanolu se výrazně neliší od uvedených hodnot etanolu. Dílenský drsnoměr Mitutoyo jsme mohli prohlásit za úspěšně zkalibrovaný. Získané hodnoty parametrů jsou v tabulce číslo 16.



Obrázek 53 - Mitutoyo - etanol

Tabulka 16 - Kalibrace Mitutoyo

| Mitutoyo SJ201P 178-930D | Opakování | Ra [ $\mu\text{m}$ ] | Rz [ $\mu\text{m}$ ] |
|--------------------------|-----------|----------------------|----------------------|
| Kalibrační vzorek        |           | 2,97                 | 9,40                 |
| Naměřeno                 | 1         | 2,98                 | 9,55                 |
|                          | 2         | 2,99                 | 9,60                 |
| Průměr                   |           | 2,99                 | 9,58                 |
| Směrodatná odchylka      |           | 0,01                 | 0,02                 |

### 3.6.2 Upnutí zkušebního vzorku

Zkušební vzorek jsme upnuli za pomoci modulární upínací sady značky Zeiss. Tento druh stavebnice obsahuje základní desku s rastrovými otvory a nastavovací prvky pro upnutí měřeného objektu. Měřený objekt jsme srovnali rovnoběžně s osou tažení měřícího hrotu drsnoměru a pevně upnuli do svěráku. Měřící hrot s opěrnou patkou je mechanicky přitlačen k měřenému povrchu silou 0,75 mN.

### 3.6.3 Volba měřených parametrů drsnosti a podmínek měření

Ovládání přístroje bylo jednoduché. V nastavení jsem zvolil základní délku 0,8 mm s vyhodnocovacím úsekem 4 mm. Pro porovnání parametrů jsem zvolil stejné nastavení jako v případě přístroje značky Blum, jen parametr  $R_{\text{max}}$  nebyl v nabídce ke zvolení.

### 3.6.4 Vyhodnocení parametrů drsnosti

Zahájení a provedení měření vyžadovalo od obsluhy jediný úkon. Stiskem tlačítka pro start měření proběhla operace měření. Měřený úsek měl celkovou délku 5,6 mm a byl změřen při rychlosti 0,5 mm/s. Po přesunutí doteku zpět vratnou rychlostí 0,8 mm/s se na displeji objeví vybrané vyhodnocené parametry. Měření proběhlo vždy dvakrát ze čtyř stran pro každý vzorek drsnosti. Za použití základní délky 0,8 mm a Gaussova filtru FC50 jsme dosáhli výsledků, viz tabulka 17.

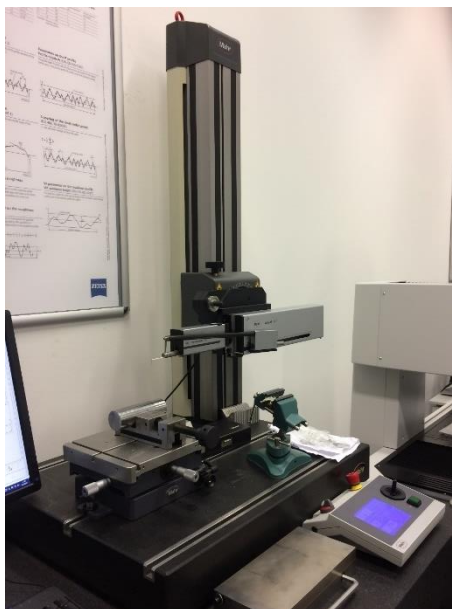
Tabulka 17 - Výsledky měření Mitutoyo

| Teoretická drsnost  | Poloha | Opakování | Ra [μm] | Rq [μm] | Rt [μm] | Rz [μm] |
|---------------------|--------|-----------|---------|---------|---------|---------|
| 3,2                 | 0°     | 1         | 2,21    | 2,57    | 8,99    | 8,85    |
|                     |        | 2         | 2,25    | 2,60    | 8,79    | 8,74    |
|                     | 90°    | 1         | 2,24    | 2,61    | 9,42    | 9,27    |
|                     |        | 2         | 2,29    | 2,65    | 9,30    | 9,24    |
|                     | 180°   | 1         | 2,25    | 2,60    | 9,11    | 8,98    |
|                     |        | 2         | 2,22    | 2,57    | 9,09    | 8,92    |
|                     | 270°   | 1         | 2,30    | 2,67    | 9,31    | 9,22    |
|                     |        | 2         | 2,27    | 2,63    | 9,29    | 9,18    |
| Průměr              |        |           | 2,25    | 2,61    | 9,16    | 9,05    |
| Směrodatná odchylka |        |           | 0,03    | 0,03    | 0,19    | 0,19    |
| 1,6                 | 0°     | 1         | 1,05    | 1,22    | 4,97    | 4,93    |
|                     |        | 2         | 1,04    | 1,20    | 4,89    | 4,59    |
|                     | 90°    | 1         | 1,04    | 1,21    | 4,81    | 4,75    |
|                     |        | 2         | 1,05    | 1,22    | 4,94    | 4,90    |
|                     | 180°   | 1         | 1,04    | 1,21    | 4,94    | 4,86    |
|                     |        | 2         | 1,04    | 1,22    | 4,93    | 4,89    |
|                     | 270°   | 1         | 1,03    | 1,19    | 4,81    | 4,67    |
|                     |        | 2         | 1,02    | 1,19    | 4,75    | 4,68    |
| Průměr              |        |           | 1,04    | 1,21    | 4,88    | 4,78    |
| Směrodatná odchylka |        |           | 0,01    | 0,01    | 0,07    | 0,12    |
| 0,8                 | 0°     | 1         | 0,05    | 0,60    | 2,51    | 2,40    |
|                     |        | 2         | 0,49    | 0,59    | 2,55    | 2,42    |
|                     | 90°    | 1         | 0,49    | 0,60    | 2,69    | 2,64    |
|                     |        | 2         | 0,48    | 0,58    | 2,48    | 2,37    |
|                     | 180°   | 1         | 0,49    | 0,59    | 2,69    | 2,50    |
|                     |        | 2         | 0,50    | 0,60    | 2,57    | 2,53    |
|                     | 270°   | 1         | 0,49    | 0,59    | 2,62    | 2,41    |
|                     |        | 2         | 0,49    | 0,60    | 2,50    | 2,59    |
| Průměr              |        |           | 0,44    | 0,59    | 2,58    | 2,48    |
| Směrodatná odchylka |        |           | 0,15    | 0,01    | 0,08    | 0,09    |

V případě opakovaného měření drsnosti povrchu na totožném místě jsme zjistili, že změřené hodnoty parametru  $R_t$  jsou vždy vyhodnoceny lépe. Důvodem je vyhlazení drážky vzniklé měřícím diamantovým hrotem s poloměrem 2  $\mu\text{m}$  z předešlé operace měření. Vzhledem k výsledným hodnotám v setinách mikrometru se není čemu divit. Pootáčení vzorku o 90° nám potvrdilo, že v případě nearitmetických výškových parametrů se povrch zkoumaného objektu liší i o dvě desetiny mikrometru. Aritmetické výškové parametry tento jev zanedbají zprůměrováním.

### 3.7 Kontrola drsnosti povrchu vzorku laboratorním přístrojem na měření drsnosti a obrysů - Marsurf XCR 20

Tímto strojem jsme schopni měřit a vyhodnocovat drsnost a konturu povrchu dílce. Měření probíhá zvolením posuvové jednotky GD 25 pro měření drsnosti povrchu nebo zvolením jednotky PCV pro měření kontury. Konfigurace přístroje umožňuje měření kontury v ose X s maximální délkou 200 mm.



**Obrázek 54 – Marsurf XCR 20**

Měření na laboratorním drsnoměru značky Mahr, jakožto druhým komparačním přístrojem, probíhalo v laboratořích ČVUT, pod vedením Ing. Mikeše, ve třech hlavních fázích.

#### 3.7.1 Upnutí zkušebního vzorku

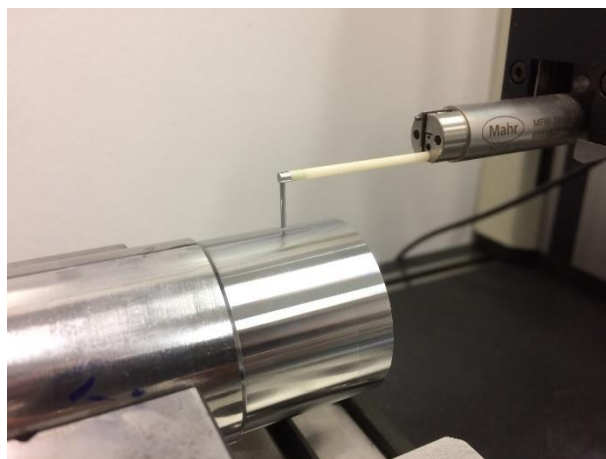
Mechanické upnutí zkoumané kulatiny probíhalo obdobným způsobem jako v případě předešlých měření. Vzorek jsme upnuli rovnoběžně s osou měření do svěráku a zafixovali. Elektrickým rychloposuvem jsme se hrotem měřicího doteku přiblížili nad měřený povrch.

#### 3.7.2 Volba měřených parametrů drsnosti a podmínek měření

Parametry a podmínky měření jsme v software měřícím prostředí XCR 20 zvolili stejné jako při měření zkoumanou sondou firmy Blum. Výběr probíhal v českém prostředí výběrem z předvoleb dle norem.

#### 3.7.3 Vyhodnocení drsnosti povrchu vzorku

Po spuštění měření sjede měřící hrot přitlačnou silou 0,75 mN k povrchu vzorku a rychlostí 0,5 mm/s změří úsek dlouhý 5,6 mm. Výstupem měření je vygenerovaný pdf protokol s podmínkami měření, výslednými hodnotami parametrů drsnosti a grafickým vyobrazením profilu drsnosti včetně grafu materiálového profilu znázorněného Abbottovou křivkou. V hlavičce protokolu nalezneme hlavní parametry měřicího stroje. Měření jsme provedli dvakrát pro každý vzorek drsnosti otočením o 180°.



**Obrázek 55 - Marsurf XCR 20 - průběh měření**

Vyhodnocení parametrů naleznete v tabulce 18. Pro případnou analýzu jsou protokoly z měření součástí příloh na CD této bakalářské práce.

**Tabulka 18 - Měření Marsurf XCR 20**

| Teoretická drsnost         | Poloha | Opakování | Ra [ $\mu\text{m}$ ] | Rq [ $\mu\text{m}$ ] | Rt [ $\mu\text{m}$ ] | Rz [ $\mu\text{m}$ ] | Rmax [ $\mu\text{m}$ ] |
|----------------------------|--------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| <b>3,2</b>                 | 0°     | 1         | 2,2160               | 2,5738               | 8,7537               | 8,6463               | 8,7537                 |
|                            | 180°   | 1         | 2,2093               | 2,5587               | 8,5925               | 8,5583               | 8,5882                 |
| <b>Průměr</b>              |        |           | <b>2,2127</b>        | <b>2,5663</b>        | <b>8,6731</b>        | <b>8,6023</b>        | <b>8,6710</b>          |
| <i>Směrodatná odchylka</i> |        |           | <i>0,0034</i>        | <i>0,0075</i>        | <i>0,0806</i>        | <i>0,0440</i>        | <i>0,0827</i>          |
| <b>1,6</b>                 | 0°     | 1         | 1,0269               | 1,1905               | 5,1595               | 4,7803               | 5,0742                 |
|                            | 180°   | 1         | 1,0177               | 1,1855               | 4,8201               | 4,6132               | 4,7291                 |
| <b>Průměr</b>              |        |           | <b>1,0223</b>        | <b>1,1880</b>        | <b>4,9898</b>        | <b>4,6968</b>        | <b>4,9017</b>          |
| <i>Směrodatná odchylka</i> |        |           | <i>0,0046</i>        | <i>0,0025</i>        | <i>0,1697</i>        | <i>0,0836</i>        | <i>0,1726</i>          |
| <b>0,8</b>                 | 0°     | 1         | 0,4775               | 0,5980               | 2,6820               | 2,6410               | 2,6700                 |
|                            | 180°   | 1         | 0,4876               | 0,5917               | 2,6396               | 2,5490               | 2,6217                 |
| <b>Průměr</b>              |        |           | <b>0,4826</b>        | <b>0,5949</b>        | <b>2,6608</b>        | <b>2,5950</b>        | <b>2,6459</b>          |
| <i>Směrodatná odchylka</i> |        |           | <i>0,0051</i>        | <i>0,0031</i>        | <i>0,0212</i>        | <i>0,0460</i>        | <i>0,0241</i>          |

### 3.8 Shrnutí výsledků měření drsnosti povrchu

**Tabulka 19 - Porovnání výsledků měření**

| Teoretická drsnost | Drsnoměr | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | Rt [ $\mu\text{m}$ ]  | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | Rmax [ $\mu\text{m}$ ] |
|--------------------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| <b>3,2</b>         | Blum     | (2,189 $\pm$ 0,024)   | (2,511 $\pm$ 0,026)   | (8,293 $\pm$ 0,081)   | (7,647 $\pm$ 0,646)   | (9,078 $\pm$ 0,036)    |
|                    | Mitutoyo | (2,25 $\pm$ 0,03)     | (2,61 $\pm$ 0,03)     | (9,16 $\pm$ 0,19)     | (9,05 $\pm$ 0,19)     | -                      |
|                    | Mahr     | (2,2127 $\pm$ 0,0034) | (2,5663 $\pm$ 0,0075) | (8,6731 $\pm$ 0,0806) | (8,6023 $\pm$ 0,0440) | (8,6710 $\pm$ 0,0827)  |
| <b>1,6</b>         | Blum     | (1,008 $\pm$ 0,017)   | (1,176 $\pm$ 0,036)   | (4,228 $\pm$ 0,105)   | (3,894 $\pm$ 0,365)   | (4,545 $\pm$ 0,054)    |
|                    | Mitutoyo | (1,04 $\pm$ 0,01)     | (1,21 $\pm$ 0,01)     | (4,88 $\pm$ 0,07)     | (4,78 $\pm$ 0,12)     | -                      |
|                    | Mahr     | (1,0223 $\pm$ 0,0046) | (1,1880 $\pm$ 0,0025) | (4,9898 $\pm$ 0,1697) | (4,6968 $\pm$ 0,0836) | (4,9017 $\pm$ 0,1726)  |
| <b>0,8</b>         | Blum     | (0,505 $\pm$ 0,004)   | (0,587 $\pm$ 0,004)   | (2,280 $\pm$ 0,043)   | (1,718 $\pm$ 0,014)   | (2,873 $\pm$ 0,031)    |
|                    | Mitutoyo | (0,44 $\pm$ 0,15)     | (0,59 $\pm$ 0,01)     | (2,58 $\pm$ 0,08)     | (2,48 $\pm$ 0,09)     | -                      |
|                    | Mahr     | (0,4826 $\pm$ 0,0051) | (0,5949 $\pm$ 0,0031) | (2,6608 $\pm$ 0,0212) | (2,5950 $\pm$ 0,0460) | (2,6459 $\pm$ 0,0241)  |

#### 3.8.1 Zhodnocení výsledků

Měření drsnosti povrchu sondou Blum TC64-RG proběhlo úspěšně se stanovením parametrů drsnosti:  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$ ,  $R_z$ ,  $R_{\text{max}}$  s velmi nízkou nejistotou hodnot. Měření bylo provedeno na připravené obrobené kulatině se třemi druhy vzorků drsnosti povrchu. Naměřené hodnoty parametrů drsnosti sondou Blum jsou v souladu s očekáváním a správnost výsledku byla potvrzena komparačními přístroji. Prvním je dílenský

drsnoměr značky Mitutoyo typ SJ201P. Druhým je laboratorní drsnoměr značky Mahr typ Marsurf XCR 20.

Každý vzorek drsnosti byl několikrát přeměřen a naměřené hodnoty byly zprůměrovány, včetně výpočtu směrodatné odchylky. Výsledky ukazují, že v případě prvních dvou hrubších drsností povrchu sonda Blum hodnotila povrch s lepší drsností, než vyhodnotila porovnávací zařízení. Hodnota v případě střední aritmetické úchytky profilu, která je dnes stále nejvíce používána, se liší v rozsahu  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ . Tento rozdílný výsledek mezi naměřenými daty je případě sondy Blum pravděpodobně způsoben větším zaoblením měřicí hrany ( $10 \mu\text{m}$ ) a několikanásobně vyšší přitlačnou silou měření ( $0,35 - 2 \text{ N}$ ) při srovnání s komparačními přístroji. To v porovnání s parametry jiných přístrojů se zaoblením špičky  $2 \mu\text{m}$  a přitlačnou silou v řádu mN má velmi výrazný účinek. Ačkoliv hodnota zaoblení měřicího hrotu  $10 \mu\text{m}$  dle normy odpovídá měření drsnosti  $R_a$  vyšší než  $10 \mu\text{m}$  při základní délce měření  $8 \text{ mm}$ , získaný výsledek měření sondou Blum je reprezentativní. Nutnost vyšší přitlačné síly vychází z obdobného rovnoměrného kontaktního tlaku hrotu na měřený povrch v poměru síly na plochu, jak je tomu v případě komparačních přístrojů.

Další výrazný vliv na nejistoty bude mít konstrukční provedení dotykového drsnoměru. Sonda TC64-RG pracuje na principu absolutního snímače, stejně jako v případě laboratorního drsnoměru Mahr. Dílenský drsnoměr Mitutoyo pracuje na principu relativního snímače s opěrnou patkou. Vzhledem k principu měření přístroje Mitutoyo je zde možnost měření s přitlačnou silou  $0,75 \text{ mN}$ .

Realizaci měření dotykovou metodou hodnotím za vhodně zvolenou. V případě optického bezkontaktního měření, které je považováno za velmi produktivní a přesné, by mohl nastat problém v odrazivosti řezné kapaliny. Ta nemá v případě kontaktního řešení vliv na výsledek. Nespornou výhodou je také možnost měření vrtaných otvorů či jiných nepřístupných ploch oproti metodě optické. Navíc dle norem je hodnota výsledku měření drsnosti povrchu reprezentativní měřením kontaktní metodou, přestože bezkontaktní metoda dává často lépe vypovídající výsledek. Nevýhodou měření za pomoci hrotu je výsledná vyrytá drážka po dráze měřicího hrotu doteku.

Z hlediska softwarové vybavenosti zařízení se vyskytly během experimentu určité potíže. Problémy nastaly v případě nečekaného zásahu obsluhy do procesu měření, někdy bylo řešením pouze ukončení programu měření.

I přes tuto jistou nedokonalost programu hodnotím tento výrobek především z hardwarové stránky za velmi povedený. Po doladění některých nečekaných vad v programu a doplnění výpočtu parametru nosného podílu  $R_{mr}$ , který je dnes z funkčního hlediska součástí velmi využíván, věřím v jeho úspěšné nasazení do strojní výroby. Pokud bude zákazník během výroby dílce potřebovat kontrolu drsnosti povrchu, je tento způsob realizace měření možný.

### 3.8.2 Ekonomické zhodnocení

Vzhledem k vysokým pořizovacím nákladům sondy Blum a veškerého nutného příslušenství, které se pohybuje v řádu deseti tisíců eur, je nutné zamyslet se nad předpokládanou návratností investice do této sondy. V případě automatizovaných výrobních linek, kde se kladou vysoké nároky na jakost kvality povrchu (letecká výroba,



automobilový průmysl, energetika atd.), má pořízení této metody měření smysl. Produktivita výrobní linky se zvýší a náklady výroby se sníží. Při výrobě jednodušších obrobků (levných, s velkými tolerancemi) nemá tato aplikace vzhledem k počáteční vysoké investici využití. Při těchto počátečních nákladech je potřeba spočítat návratnost pro každý výrobek a nelze v tuto chvíli uvažovat o ekonomickém zhodnocení obecně.

### **3.8.3 Návrh průmyslové aplikace**

Progresivní myšlenka a realizace firmy Blum vyplnila v roce 2013 mezeru na trhu. Uvádím příklad aplikace a následující úspory na nákladech výrobní linky.

Automatická výrobní linka skládající se z deseti obráběcích strojů, které jsou propojeny kloubovými roboty a které obrábějí jeden druh drahého dílce (vysoké nároky na obrobený povrch), jenž končí výstupní kontrolou. Ta sestává i z měření drsnosti povrchu, který se obrábí v první fázi výroby. Pokud v rámci procesu obrábění na prvním stroji neprovedeme přeměření nutně požadované drsnosti povrchu a vyčkáme s kontrolou až v poslední části procesu externě mimo automatizovanou linku, můžeme být informováni o nedodržení stanovených tolerancí požadavků povrchu vyrobeného dílce. To znamená nejen špatný výsledek vyhodnocení onoho výrobku, ale pravděpodobně i dalších devíti právě obráběných dílců. Je třeba uvažovat, že výsledná cena obrobku je s každým následujícím obráběním vyšší. Nabízí se možnost vyřešit tuto problematiku externím přeměřením po vyjmutí z prvního obráběcího stroje, případně přeměřením přenosným drsnoměrem přímo v upnutí stroje. Toto řešení problému je bez možnosti integrování kontroly do stroje řešením jediným, ovšem pro výrobní linku nevhodným. V případě požadovaných velmi vysokých rychlostí kloubových robotů uzavřených v ochranné kleci je tento lidský zásah do automatizované výrobní linky velmi kontraproduktivní. Nasazením spolupracujícího robota ztrácíme potenciál rychlosti výroby. Robot má totiž pouze 20procentní rychlost a snímače, které ho automaticky zastaví. V případě potřeby znalosti definované drsnosti povrchu a ve smyslu požadavků průmyslu 4.0 věřím v možnost nasazení této kontrolní a vyhodnocovací metody s výstupem určitého výsledku či návrhu na přizpůsobení následného postupu řešení. Opět zde platí pravidlo - náklady pořízení aplikace versus výsledný užitek.



## 4 Závěr bakalářské práce

Cílem teoretické části bylo poskytnout čtenáři ucelený přehled odborné rešerše na téma drsnost povrchu, nejen dnes již z klasických literárních zdrojů, ale i z nejnovějších měsíčníků ze světa metrologie.

Je zde popsán vliv drsnosti povrchu na funkční vlastnosti plochy, vliv způsobu obrábění povrchu na jakost kvality výsledné plochy. V práci byly zavedeny nezbytné technické termíny a veličiny. Představeny byly způsoby měření a typy měřících přístrojů. Detailněji se v bakalářské práci věnuji normalizovaným parametrům dle ČSN EN ISO 4287, ale i jiným parametrům drsnosti povrchu vzhledem k různým požadavkům na výslednou plochu.

Práce slouží pro vytvoření si základní představy o vztahu konstruktéra, technologa a metrologa. Provedená rešerše v teoretické části práce mi pomohla proniknout do dané problematiky a s lepším přehledem řešit následný experiment.

Experimentální část práce jsem zpracoval s cílem ověřit použitelnost aplikace sondy Blum TC64-RG. Vzhledem k častému zájmu a množství dotazů potenciálních zákazníků o tuto metodu měření drsnosti povrchu mě firma Misan s.r.o. požádala o zhodnocení reálného přínosu této kontrolní metody při uvažovaném nasazení do strojní výroby.

Po představení tohoto progresivního způsobu měření drsnosti povrchu jsem se věnoval instalaci sondy a základním příkazům pro obsluhu sondy. Popsána byla geometrie snímacího doteku a podstatné vlivy a podmínky na naměřené hodnoty. Hlavním cílem experimentální části je změření drsnosti povrchu vyrobeného vzorku a následná verifikace pomocí dílenského drsnoměru značky Mitutoyo typ SJ201P a laboratorního zařízení značky Mahr typ Marsurf XCR 20. Vyhodnocení výsledků hodnot parametrů drsnosti povrchu přineslo zjištění, že je aplikace sondy Blum využitelná pro měření drsnosti povrchu dílců ve strojní výrobě. Na konci mé práce jsou získané výsledky komentovány a také je navržena možná situace aplikace ve strojním průmyslu.

### Zhodnocení výsledků experimentu

V případě nutnosti kontroly drsnosti povrchu obráběného dílce je tato metoda měření pro průmyslové aplikace využitelná. Vzhledem k vyšším pořizovacím nákladům sondy je nasazení této metody měření drsnosti povrchu možné v případě automatizovaných výrobních linek, kde se kladou vysoké nároky na kvalitu obrobku povrchu. Aplikace této sondy od firmy Blum zkrátí čas výroby, zvýší produktivitu výrobní linky a sníží náklady výroby. Z hlediska software vybavení není tato metoda měření vždy stabilní a odolná vůči nečekaným zásahům operátora. Tento negativní jev způsobí restart měřícího programu, případně i celého obráběcího stroje. Výhodou programu je jednoduchost měření a obsluha v českém jazyce. Z hlediska hardware vybavení hodnotím tento produkt za velmi vydařený. Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu byly v souladu s očekáváním. Od výstupů komparačních přístrojů se tato metoda neliší (je zde pouze nevýznamný rozdíl  $R_a \pm 0,1 \mu\text{m}$ ). Sonda Blum TC64-RG najde uplatnění u obrobků s nároky na kontrolu vyšší kvality povrchu, jako je tomu v letecké výrobě, energetice atd.

## 5 Citovaná literatura

1. Doc. Ing. Karel Slanec, CSc. *Základy konstruování*. Praha : ČVUT, 1996.
2. Bumbálek, Bohumil, Odvody, Vladimír a Ošťádal, Bohuslav. *Drsnost povrchu*. Praha : SNTL, 1989.
3. AB SANDVIK COROMANT. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Praha : Scientia, s. r. o., 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6.
4. Neckář, Ferdinand a Kvasnička, Ivo. *Vybrané statě z úběru materiálu*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 1991.
5. Hluchý, Miroslav. *Strojírenská technologie 1 - Nauka o materiálu*. Praha : SNTL, 1978.
6. ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 4288. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1997.
7. Macek, Karel, Zuna, Petr a Bartoš, Jiří. *Nauka o materiálu II*. Praha : SNTL, 1986.
8. Opotřebení břitů nástrojů ze slinutých karbidů. *mmspektrum.com*. [Online] mmspektrum, 02. 02 2005. [Citace: 2. 3 2017.] <http://www.mmspektrum.com/clanek/opotrebeni-britu-nastroju-ze-slinutych-karbidu-2.html>.
9. *Drsnost povrchu*. místo neznámé : S.l.: s.n., 1956.
10. Pluhař, Jaroslav a Koritta, Josef. *Strojírenské materiály*. Praha : SNTL, 1977.
11. Příručka obrábění. *Pramet*. [Online] Pramet, 2004. [Citace: 05. 04 2017.] [http://www.isstechn.cz/objekty/prirucka\\_\\_obrabeni.pdf](http://www.isstechn.cz/objekty/prirucka__obrabeni.pdf).
12. ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 4287. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1997.
13. Měříte správně strukturu povrchu? *MM Spektrum*. [Online] MM Průmyslové spektrum, 10. 7 2002. [Citace: 27. 10 1016.] <http://www.mmspektrum.com/clanek/merite-spravne-strukturu-povrchu.html>.
14. Company - History. *Blum-Novotest.de*. [Online] Blum Novotest, 2016. [Citace: 29. 10 2016.] <http://www.blum-novotest.de/cz/o-spolecnosti/history.html>.
15. Měříte správně strukturu povrchu? *MM Průmyslové spektrum*. [Online] [Citace: 19. 10 2016.] <http://www.mmspektrum.com/clanek/merite-spravne-strukturu-povrchu-2.html>.
16. Surface Roughness Measurement. [Online] [Citace: 10. 11 2016.] [http://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2012/11/1984\\_\\_Surf\\_\\_Roughness\\_\\_PG.pdf](http://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2012/11/1984__Surf__Roughness__PG.pdf).
17. Petr Šňupárek, Martin Marek. <http://fei1.vsb.cz/>. *Technická dokumentace - drsnost povrchu*. [Online] [Citace: 28. 4 2016.]

[http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni\\_materialy/td/01-textyVSB/005\\_Drsnost%20povrchu.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/td/01-textyVSB/005_Drsnost%20povrchu.pdf).

18. Zvyšování kvality hodnocení struktury povrchu. *MM Průmyslové spektrum*. [Online] MM Průmyslové spektrum, 16. 11 2004. [Citace: 27. 10 2016.]

<http://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-kvality-hodnoceni-struktury-povrchu.html>.

19. Zvyšování kvality hodnocení struktury povrchu. *MM Spektrum*. [Online] MM Průmyslové spektrum, 15. 12 2004. [Citace: 27. 10 2016.]

<http://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-kvality-hodnoceni-struktury-povrchu-2.html>.

20. Mathematical, Society European. *Přístroje pro přesná měření*. Praha : EMS, 2004.

21. Pokrok v měření a hodnocení struktury povrchu. *MM Spektrum*. [Online] MM Průmyslové spektrum, 11. 4 2001. [Citace: 27. 10 2016.]

<http://www.mmspektrum.com/clanek/pokrok-v-mereni-a-hodnoceni-struktury-povrchu.html>.

22. Měření struktury povrchu. *MM Spektrum*. [Online] MM Průmyslové spektrum, 18. 03 2003. [Citace: 28. 10 2016.] <http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-struktury-povrchu.html>.

23. Normální rozdělení. *wikiskripta*. [Online] Wikiskripta.eu. [Citace: 02. 03 2017.]

[http://www.wikiskripta.eu/index.php/Norm%C3%A1ln%C3%AD\\_rozd%C4%9Blen%C3%AD](http://www.wikiskripta.eu/index.php/Norm%C3%A1ln%C3%AD_rozd%C4%9Blen%C3%AD).

24. CeST. *Gaussova křivka*. [Obrázek] Praha : WikiSkripta, 2016.

25. Technické informace. *Hommel-etamic.cz*. [Online] Hommel Etamic. [Citace: 01. 11 2016.] <http://www.hommel-etamic.cz/cz/technicke-informace/faq-nejcasteji-kladene-otazky/>.

26. PRIMA Bilavčík s.r.o. Přístroje pro měření a metrologii 2016. *Přístroje pro měření a metrologii*. 2016.

27. Dotykové, nebo bezdotykové měření struktury povrchu? *MM Spektrum*. [Online] MM Průmyslové spektrum, 15. 6 2005. [Citace: 28. 10 2006.]

<http://www.mmspektrum.com/clanek/dotykovne-bezdotykovne-mereni-struktury-povrchu.html>.

28. Skripta Technologie II 1 díl - HomeL. [Online] [Citace: 24. 4 2016.]

[http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta\\_Technologie\\_\\_II\\_\\_1\\_dil.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie__II__1_dil.pdf).

29. Drsnost na obvodu stykových ploch. *MM Spektrum*. [Online] MM Průmyslové spektrum, 24. 06 2009. [Citace: 28. 10 2016.]

<http://www.mmspektrum.com/clanek/drsnost-na-obvodu-stykovych-ploch.html>.

30. Co se skrývá pod výrazy Industry 4.0. *Automatizace.hw.cz*. [Online]

Automatizace.hw. [Citace: 3. 2 2017.] <http://automatizace.hw.cz/mimochodem/co-je-se-skriva-pod-vyrazy-industry-40-prumysl-40.html>.

31. Prostorová charakteristika textury povrchu. *MM Spektrum*. [Online] MM Průmyslové spektrum, 07. 10 2009. [Citace: 31. 10 2016.]  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/prostorova-charakteristika-textury-povrchu.html>.
32. Prostorové hodnocení struktury povrchu. *MM Spektrum*. [Online] MM Průmyslové spektrum, 15. 6 2005. [Citace: 28. 10 2016.]  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/prostorove-hodnoceni-struktury-povrchu.html>.
33. 4D – progresivní analýzy změn textury povrchu. *MM Spektrum*. [Online] MM Průmyslové spektrum, 24. 6 2009. [Citace: 28. 10 2016.]  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/drsnost-na-obvodu-stykovych-ploch.html>.
34. Nový snímač umožňuje plně automatické měření drsnosti povrchu na souřadnicových měřicích strojích. *Renishaw.cz*. [Online] Renishaw apply Innovation, 25. 07 2011. [Citace: 29. 10 2016.] <http://www.renishaw.cz/cs/novy-snimac-umoznuje-plne-automaticke-mereni-drsnosti-povrchu-na-souradnicovych-mericich-strojich--11148>.
35. Zeiss - Surfcom C5. *Zeiss.com*. [Online] Zeiss. [Citace: 4. 3 2017.]  
<https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/form-and-surface/cnc-surface-measuring-instruments/surfcom-c5.html>.
36. Integrace měření drsnosti povrchu do obráběcích strojů. *MM Spektrum*. [Online] MM Průmyslové spektrum, 10. 09 2014. [Citace: 29. 10 2016.]  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/integrace-mereni-drsnosti-povrchu-do-obrabecich-stroju.html>.
37. Blum. *Blum-novotest.com*. [Online] Blum Novotest. [Citace: 8. 1 2017.]  
<https://www.blum-novotest.com/cz/produkty/messkomponenten/rauheitsmessgeraete/tc63-tc64-tc76-rg.html>.
38. Misan s.r.o. *Misan - Obráběcí stroje a nástroje*. [Online] [Citace: 3. 3 2017.]  
<http://www.misan.cz/okuma/katalog-detail/mu-6300v-okuma-mu-6300v/>.
39. Mičoch, Lubomír. *Řízení kvality a strojírenská metrologie*. Praha : SNTL/ALFA, 1987.
40. Přikryl, Zdeněk a Musílková, Rosa. *Teorie obrábění*. Praha : SNTL, 1975.
41. Vintner, František a Houdek, Josef. *Řezné síly při obrábění*. Praha : VÚOSO, 1970.

# 6 Seznamy

## 6.1 Seznam obrázků

|                                                                                                                |        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Obrázek 1 – Vliv geometrie břitu a posuvu na drsnosti [1] .....                                                | - 15 - |
| Obrázek 2 - Velmi malý poloměr špičky [1] .....                                                                | - 22 - |
| Obrázek 3 - špička s poloměrem zaoblení r [1] .....                                                            | - 22 - |
| Obrázek 4 - Profily [2].....                                                                                   | - 27 - |
| Obrázek 5 – Vlnové délky [12] .....                                                                            | - 27 - |
| Obrázek 6 – Souřadnicový systém [12].....                                                                      | - 28 - |
| Obrázek 7 – Skutečný a jmenovitý profil [1] .....                                                              | - 28 - |
| Obrázek 8 – Příčný a podélný profil [1] .....                                                                  | - 28 - |
| Obrázek 9 – Základní délka [14].....                                                                           | - 29 - |
| Obrázek 10 – Střední (aritmetická) čára profilu [1] .....                                                      | - 30 - |
| Obrázek 11 – Místní výstupek a prohlubeň profilu [1] .....                                                     | - 31 - |
| Obrázek 12 – Čára výstupků a prohlubní profilu [1] .....                                                       | - 31 - |
| Obrázek 13 – Rp [12].....                                                                                      | - 32 - |
| Obrázek 14 – Rv [12] .....                                                                                     | - 32 - |
| Obrázek 15 – Rz [12] .....                                                                                     | - 32 - |
| Obrázek 16 – Rt [12] .....                                                                                     | - 33 - |
| Obrázek 17 – Rc [12] .....                                                                                     | - 34 - |
| Obrázek 18 – Rq [12].....                                                                                      | - 35 - |
| Obrázek 19 – Ra [17] .....                                                                                     | - 35 - |
| Obrázek 20 – Rsm [12].....                                                                                     | - 37 - |
| Obrázek 21 – Rmr(c) [12] .....                                                                                 | - 38 - |
| Obrázek 22 – Různý tvar, stejná hodnota Ra [1] .....                                                           | - 40 - |
| Obrázek 23 - Příklad parametrů [20].....                                                                       | - 41 - |
| Obrázek 24 – Snímač absolutní [1].....                                                                         | - 47 - |
| Obrázek 25 – Snímač relativní [1] .....                                                                        | - 47 - |
| Obrázek 26 – Vliv vzdálenosti opěrné patky [2].....                                                            | - 47 - |
| Obrázek 27 - Snímač na měření rovných ploch a hřidelí [20] .....                                               | - 48 - |
| Obrázek 28 - Snímač na měření od čela [20].....                                                                | - 48 - |
| Obrázek 29 - Snímač na měření plechů [20].....                                                                 | - 49 - |
| Obrázek 30 - Snímač na měření otvorů od průměru 2 mm [20].....                                                 | - 49 - |
| Obrázek 31 - Snímač na měření konkávních a konvexních ploch [20].....                                          | - 49 - |
| Obrázek 32 - Snímač na měření drsnosti v zápichu [20] .....                                                    | - 49 - |
| Obrázek 33 - Snímač na měření drsnosti boku ozubených kol [20].....                                            | - 49 - |
| Obrázek 34 - Snímač s teflonovou kluznou patkou pro měření velmi citlivých ploch<br>měřeného povrchu [20]..... | - 50 - |
| Obrázek 35 – Rozptyl světla [1] .....                                                                          | - 51 - |
| Obrázek 36 - Schéma zapojení – Blum [37].....                                                                  | - 60 - |
| Obrázek 37 -Výkres zkušebního vzorku .....                                                                     | - 63 - |
| Obrázek 38 – Snímací dotek Blum – kolmost [37] .....                                                           | - 64 - |
| Obrázek 39 - Snímací dotek – Blum .....                                                                        | - 65 - |
| Obrázek 40 - Upnutí vzorku ve stroji .....                                                                     | - 66 - |
| Obrázek 41 - Detailnější pohled upnutí.....                                                                    | - 66 - |
| Obrázek 42 - Změření pozice vzorku .....                                                                       | - 67 - |

|                                                  |        |
|--------------------------------------------------|--------|
| Obrázek 43 - Blum - Vstupní parametry .....      | - 69 - |
| Obrázek 44 - Blum - Režim obrobkové sondy .....  | - 70 - |
| Obrázek 45 - Blum - Režim měření drsnosti .....  | - 70 - |
| Obrázek 46 - Blum - Průběh měření.....           | - 70 - |
| Obrázek 47 - Blum - Proměnný .....               | - 71 - |
| Obrázek 48 - Blum - Základní profil .....        | - 71 - |
| Obrázek 49 - Blum - Vlnitost .....               | - 72 - |
| Obrázek 50 - Blum - Drsnost povrchu .....        | - 72 - |
| Obrázek 51 - Blum - Odchylka tvaru .....         | - 72 - |
| Obrázek 52 - Mitutoyo .....                      | - 74 - |
| Obrázek 53 - Mitutoyo - etanol.....              | - 74 - |
| Obrázek 54 - Marsurf XCR 20.....                 | - 77 - |
| Obrázek 55 - Marsurf XCR 20 - průběh měření..... | - 78 - |

## 6.2 Seznam grafů

|                                                                            |        |
|----------------------------------------------------------------------------|--------|
| Graf 1 – Vliv řezné rychlosti a materiálu nástroje na drsnost [4].....     | - 16 - |
| Graf 2 – Závislost výrobních nákladů na drsnosti povrchu [4].....          | - 18 - |
| Graf 3 - Závislost drsnosti povrchu Ra na posuvu s a rychlosti v [1] ..... | - 20 - |
| Graf 4 - Převod Ra – Rz [3] .....                                          | - 39 - |
| Graf 5 - Gaussova křivka [24] .....                                        | - 44 - |

## 6.3 Seznam tabulek

|                                                                    |        |
|--------------------------------------------------------------------|--------|
| Tabulka 1 - Příčiny a důsledky narušení povrchové vrstvy [7] ..... | - 14 - |
| Tabulka 2 - Historické značení drsnosti povrchu [9] .....          | - 24 - |
| Tabulka 3 - Doplnkové značení obrobení broušením [9].....          | - 24 - |
| Tabulka 4 - Způsob obrábění – $R_a$ [1] .....                      | - 36 - |
| Tabulka 5 - Typické metody – $R_a$ [2].....                        | - 40 - |
| Tabulka 6 - Způsob výroby – $R_a$ [2].....                         | - 40 - |
| Tabulka 7 – Součinitel K [1].....                                  | - 54 - |
| Tabulka 8 – Součinitel K vzhledem k uložení [1] .....              | - 54 - |
| Tabulka 9 - Blum sondy - $R_a$ min.....                            | - 58 - |
| Tabulka 10 - Technické parametry sond.....                         | - 59 - |
| Tabulka 11 - Q parametr - Blum .....                               | - 61 - |
| Tabulka 12 - Přiřazení drsnosti povrchu k proměnným stroje .....   | - 62 - |
| Tabulka 13 - Zvolený posuv při obrábění .....                      | - 63 - |
| Tabulka 14 - Podmínky měření - shrnutí .....                       | - 65 - |
| Tabulka 15 - Výsledky měření Blum.....                             | - 73 - |
| Tabulka 16 - Kalibrace Mitutoyo.....                               | - 75 - |
| Tabulka 17 - Výsledky měření Mitutoyo .....                        | - 76 - |
| Tabulka 18 - Měření Marsurf XCR 20.....                            | - 78 - |
| Tabulka 19 - Porovnání výsledků měření .....                       | - 78 - |

## 6.4 Seznam rovnic

|                                                    |        |
|----------------------------------------------------|--------|
| Rovnice 1 - Největší výška profilu Rz .....        | - 22 - |
| Rovnice 2 - Vyjádření Rz .....                     | - 22 - |
| Rovnice 3 - Rz se zaoblenou špičkou nástroje ..... | - 22 - |

|                                                     |        |
|-----------------------------------------------------|--------|
| Rovnice 4 - Max hodnota stoupání.....               | - 22 - |
| Rovnice 5 - Rz.....                                 | - 22 - |
| Rovnice 6 - Rz.....                                 | - 23 - |
| Rovnice 7 - Ra.....                                 | - 23 - |
| Rovnice 8 – In.....                                 | - 30 - |
| Rovnice 9 – Střední čára nejmenších čtverců.....    | - 30 - |
| Rovnice 10 – Střední aritmetická čára profilu ..... | - 31 - |
| Rovnice 11 - Rz.....                                | - 33 - |
| Rovnice 12 - Rzi .....                              | - 33 - |
| Rovnice 13 - Vztah Rz Rt .....                      | - 33 - |
| Rovnice 14 - Rz a Rt.....                           | - 33 - |
| Rovnice 15 - Ry .....                               | - 34 - |
| Rovnice 16 - Rc.....                                | - 34 - |
| Rovnice 17 - Rq .....                               | - 34 - |
| Rovnice 18 - Ra .....                               | - 35 - |
| Rovnice 19 – RSm .....                              | - 37 - |
| Rovnice 20 – Rmr(c) .....                           | - 37 - |
| Rovnice 21 - RΔq .....                              | - 38 - |
| Rovnice 22 - IO.....                                | - 39 - |
| Rovnice 23 – Gaussova křivka.....                   | - 44 - |
| Rovnice 24 – Vztah drsnosti a tolerance .....       | - 54 - |
| Rovnice 25 – Převod Rz Ra.....                      | - 54 - |
| Rovnice 26 - Směrodatná odchylka .....              | - 73 - |

## 6.5 Seznam myšlenkových map

|                                              |        |
|----------------------------------------------|--------|
| Myšlenková mapa 1 – Tolerance [1].....       | - 11 - |
| Myšlenková mapa 2 – Stav povrchu [1] .....   | - 12 - |
| Myšlenková mapa 3 – Funkční plocha [1] ..... | - 52 - |

## Seznam zkratek

| Značka          | Název                                            | Jednotka | Ekvivalentní značení |
|-----------------|--------------------------------------------------|----------|----------------------|
| $a_p$           | Hloubka řezu                                     | mm       |                      |
| $D$             | Průměr                                           | mm       |                      |
| $E$             | Modul pružnosti                                  | Mpa      |                      |
| $f$             | posuv                                            | mm       | s                    |
| $f_e$           | Posuv na krok                                    | mm       |                      |
| $f_n$           | Posuv na otáčku                                  | mm/ot    |                      |
| $f_z$           | Posuv na zub                                     | mm/zub   |                      |
| $k_R$           | Součinitel obrobitelnosti určen dle drsnosti     | -        |                      |
| $l$             | Základní délka                                   | mm       | $l_r$                |
| $L_0$           | Délka rozvinutého profilu                        | mm       |                      |
| $l_0$           | Relativní délka profilu                          | -        |                      |
| $l_n$           | Vyhodnocovaná délka                              | mm       |                      |
| $l_p$           | Základní délka primárního profilu                | mm       |                      |
| $l_r$           | Základní délka drsnosti                          | mm       | $l$                  |
| $l_t$           | Délka měřeného úseku                             | mm       |                      |
| $m$             | střední čára profilu                             | -        |                      |
| $n$             | Počet otáček vřetene                             | 1/min    |                      |
| $P$             | Základní profil                                  | -        |                      |
| $p$             | tlak                                             | Mpa      |                      |
| $P_t$           | Celková výška základního profilu                 | $\mu m$  |                      |
| $P_z$           | Maximální výška základního profilu               | $\mu m$  |                      |
| $R$             | Profil drsnosti                                  | -        |                      |
| $R_a$           | Střední aritmetická úchylka profilu              | $\mu m$  |                      |
| $R_c$           | Průměrná výška prvků profilu                     | $\mu m$  |                      |
| $R_{ku}$        | Špičatost posuzovaného povrchu                   | -        |                      |
| $R_{max}$       | Maximální výška profilu                          | $\mu m$  | $R_{z1max}$          |
| $R_{mr}$        | Nosný podíl profilu                              | %        | $t_p$                |
| $R_p$           | Největší výška výstupku profilu                  | $\mu m$  |                      |
| $R_q$           | Střední kvadratická úchylka drsnosti             | $\mu m$  |                      |
| $R_{sk}$        | Šikmost posuzovaného povrchu                     | -        |                      |
| $R_{sm}$        | Průměrná šířka prvků profilu                     | $\mu m$  |                      |
| $R_t$           | Celková výška profilu                            | $\mu m$  |                      |
| $R_v$           | Největší hloubka prohlubně profilu               | $\mu m$  |                      |
| $R_y$           | Výška nerovností profilu z deseti bodů           | $\mu m$  |                      |
| $R_z$           | Maximální výška profilu                          | $\mu m$  |                      |
| $R_{z_i}$       | Maximální výška profilu v průměru                | $\mu m$  |                      |
| $R_{\Delta q}$  | Průměrný kvadratický sklon profilu               | °        |                      |
| $r_\varepsilon$ | Poloměr špičky řezného nástroje                  | mm       |                      |
| $s$             | posuv                                            | mm       | $f$                  |
| $S_a$           | Střední aritmetická úchylka profilu - prostorově | $\mu m$  |                      |
| $S_n$           | Šířka rozptylu světla                            | -        |                      |
| $T_D$           | Rozměrová tolerance                              | $\mu m$  |                      |
| $v$             | řezná rychlost                                   | m/min    |                      |
| $W$             | Profil vlnitosti                                 | -        |                      |
| $\bar{X}$       | Průměrná hodnota                                 | -        |                      |
| $z$             | Počet zubů frézy                                 | -        |                      |
| $Z_p$           | Výstupek drsnosti                                | $\mu m$  |                      |
| $Z_t$           | Výška drsnosti povrchu                           | $\mu m$  |                      |
| $Z_v$           | Prohlubeň drsnosti                               | $\mu m$  |                      |
| $\gamma'$       | Součinitel náhodnosti povrchu                    | -        |                      |
| $\kappa$        | Hlavní úhlen ostří                               | °        | $\kappa_r$           |
| $\kappa'$       | Vedlejší úhel ostří (nastavení)                  | °        | $\kappa'_r$          |
| $\lambda$       | Vlnová délka                                     | mm       |                      |
| $\lambda_c$     | $\lambda_c$ filtr profilu Cut-off                | $\mu m$  |                      |
| $\lambda_f$     | $\lambda_f$ filtr profilu                        | $\mu m$  |                      |
| $\lambda_s$     | $\lambda_s$ filtr profilu                        | $\mu m$  |                      |
| $\mu$           | Střední hodnota                                  | -        |                      |
| $\sigma$        | Směrodatná odchylka                              | -        |                      |
| $\sigma^2$      | Rozptyl                                          | -        |                      |



## 7 Přílohy

### 7.1 Technické parametry Okuma MU-6300V

|                                        |                          |
|----------------------------------------|--------------------------|
| <b>Pracovní stůl</b>                   |                          |
| Průměr upínací plochy                  | 630 (6x T 18H7) mm       |
| Max. rozměry obrobku                   | Ø 830 x H 550 mm         |
| Max. otáčky                            | 90 ot/min                |
| Max. zatížení stolu                    | 600 kg                   |
| <b>Rozsah pojezdů os</b>               |                          |
| Osa X                                  | 925 mm                   |
| Osa Y                                  | 1050 mm                  |
| Osa Z                                  | 600 mm                   |
| Osa A                                  | +90 až -120 °            |
| Osa C                                  | 360 (neomezeně) °        |
| <b>Posuvy</b>                          |                          |
| Rychloposuv                            | X/Y/Z: 50 m/min          |
| Rychloposuv rotačních os               | A/C: 10.800/32.400 °/min |
| Max. pracovní posuv                    | X/Y/Z: 50 m/min          |
| <b>Pracovní vřeteno</b>                |                          |
| Rozsah otáček                          | 12 tis. ot/min           |
| Upínací kužel                          | MAS                      |
| Výkon motoru (10 min/trvale)           | 26/18,5 (12t) kW         |
| Vnitřní průměr ložiska                 | 70 mm                    |
| Vzdálenost vřeteno-stůl                | 160 až 760 mm            |
| <b>Nástrojový zásobník</b>             |                          |
| Provedení                              | MAS                      |
| Počet nástrojových míst                | 48                       |
| Max. průměr nástroje                   | 100 mm                   |
| Max. délka nástroje (od konce vřetena) | 400 mm                   |
| Max. hmotnost nástroje                 | 12 kg                    |
| <b>Ostatní</b>                         |                          |
| Objem nádrže chladicí kapaliny         | 770 L                    |
| <b>Strojní data</b>                    |                          |
| Výška                                  | 3525 mm                  |
| Šířka                                  | 4850 mm                  |
| Hloubka                                | 2990 mm                  |
| Hmotnost                               | 17500 kg                 |
| Řídicí systém                          | OSP-P300M                |

### 7.2 CD